

ENERGEETIKA. ELEKTROTEHNIKA. MÄENDUS D50

**Eesti ettevõtete elektritarbimise  
uurimine ja soovituste väljatöötamine  
tarbimise optimeerimiseks**

TOOMAS VINNAL

Tallinna Tehnikaülikool  
Energeetikateaduskond  
Elektrotehnika aluste ja elektrimasinate instituut

**Doktoritöö on lubatud kaitsmisele filosoofiadoktori kraadi taotlemiseks  
energia- ja geotehnika erialal 7. novembril 2011**

**Juhendaja:** Kuno Janson, professor,  
Elektrotehnika aluste ja elektrimasinate instituut,  
Tallinna Tehnikaülikool

**Oponendid:** Juhani Tellinen, tehnikadoktor, GAMGA OY, Soome  
Peeter Raesaar, tehnikakandidaat, Elektroenergeetika  
instituut, Tallinna Tehnikaülikool

Doktoritöö kaitsmise aeg: 15. detsember 2011

Deklaratsioon

Deklareerin, et käesolev väitekiri, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli filosoofiadoktori kraadi taotlemiseks ja selle alusel ei ole varem taotletud akadeemilist kraadi.

Allkiri

Autoriõigus: Toomas Vinnal, 2011

ISSN 1406-474X

ISBN 978-9949-23-215-4 (publication)

ISBN 978-9949-23-216-1 (PDF)

THESIS ON POWER ENGINEERING,  
ELECTRICAL ENGINEERING, MINING ENGINEERING D50

**Study of Electric Power Consumption in  
Estonian Companies and Recommendations for  
Optimization of Consumption**

TOOMAS VINNAL

**TUT**  
PRESS



## EESSÕNA

Käesoleva väitekirja materjali peamine osa on kogutud aastatel 1998...2010 seoses elektritarbimise uuringutega Eesti erinevates ettevõtetes. Uuringute läbiviimise käigus ja samuti seoses reaktiivvõimsuse kompenseerimisega tekkinud probleemide lahendamine ärgitas edasisele uurimisele ning seejärel juba tulemuste üldistamisele. Uurimistöös olen saanud toetuda TTÜ Elektrotehnika aluste ja elektrimasinate instituudis kogutud teadmistele selles valdkonnas. Väitekiri on koostatud heas usus ja lootuses, et sellest on kasu ka ettevõtete elektrikala ja tehnikaspetsialistidel.

Väitekirja koostamise alustamiseks andis otsustava tõuke minu juhendaja professor Kuno Janson, kes ühel 2007. aasta ilusal kevadpäeval seadis mind fakti ette, et on mind doktorandina kirja pannud. Samuti on mind sellel teel algusest peale toetanud professor Jaan Järvik. Eeskätt tänu Kuno Jansonile ja Jaan Järviku julgustavale ja toetavale suhtumisele ongi käesolev töö valminud. Selle tugeva toetuse eest sügav tänu.

Käesoleva töö olulise osa moodustavad probleemid, mis on seotud elektrienergia tõhusa ja säästliku kasutamisega ettevõtetes. Samuti on tähelepanu all toitepinge kvaliteet ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides ning seosed toitepinge kvaliteedi ja elektritarbimise vahel. Nende probleemide uurimisel olen saanud toetuda Eesti ettevõtetes kogutud mõttetulemustele ja praktilistele töödele.

Usaldusel põhinev koostöö Eesti ettevõtetes on mind kokku viinud paljude tublide tehnikainimestega, keda südamest tänan. Siinkohal saan nimetada ainult mõned neist – Aivo Kaer, Aimar Tapner, Jaak Enno, Margus Levo, Maarek Jõhve, Haivo Laulik, Toivo Maripuu, Juss Torp, Tarmo Leht, Peeter Altvee, Ants Pastarus, Rein Kariler, Toivo Šarai, Rein Soekov, Meelis Havi, Kalju Tropp, Arne Peel, Rein Rajamets, Tiido Kullerkupp, Erkki Moosel, Merabi Liiber, Olev Kroon, Eugen Soonvald, Urmas Lillepalu, Kaul Augasmägi, Villu Teor, Udo Tell, Ago Tint. Koostöö kõigi nende inimestega ja ka paljude teistega on andnud mulle võimaluse uurida ettevõtete elektrivarustuse probleeme praktikas.

Palju tänu kõigile kolleegidele Elektrotehnika aluste ja elektrimasinate instituudist, kes on olnud minu töö valmimisel toeks. Eraldi tahan tänada dotsent Heljut Kaldat ja vanemteadur Tiiu Sakkost väga tõhusa abi eest väitekirja viimistlemisel ning kauaaegset kaastöötajat ja head sõpra Eda Ihlbergi abi eest töö vormistamisel.

Käesoleva väitekirja valmimise ja sellele eelnenu töö vundamendiks on olnud minu perekonna, eelkõige minu abikaasa Anni ja meie laste Mare, Hannese ja Eeva toetus, ilma milleta seda tööd küll vaevalt oleks sündinud.

Tallinnas, 13. novembril 2011

Toomas Vinnal

# SISUKORD

<b>1 Elektritarbimise olukord ja arengud Eestis, probleemide püstitus ja töö eesmärgid</b> .....	10
1.1 Sissejuhatus .....	10
1.2 Elektritarbimise ja elektrikvaliteedi olukord Eestis aastatel 1992...2010 .....	10
1.3 Probleemide püstitus .....	18
1.4 Töö eesmärgid .....	19
<b>2 Üldkasutatav meetodika ettevõtete elektritarbimise ja toitepinge kvaliteedi uurimisel</b> .....	20
2.1 Ettevõtete elektritarbimise uurimise ja optimeerimise eesmärgid .....	20
2.2 Ettevõtte elektrikulude optimeerimisvõimalused .....	21
2.3 Elektrivarustus ja toitepinge kvaliteet .....	22
2.4 Toitepinge kvaliteeti mõjutavad tegurid, kvaliteeditasemed ja uurimise-eesmärgid .....	24
2.5 Mõõtepunktide valik toitepinge kvaliteedi uurimisel .....	26
2.6 Elektritarbimise mõõtmine ja registreerimine .....	27
2.7 Pinge kvaliteedi mõõtetulemuste analüüs .....	28
2.8 Ettevõtete elektritarbimist iseloomustavad arvulised parameetrid .....	28
2.9 Elektritarbimist iseloomustavad koormusgraafikud .....	29
2.10 Tarbija ja ülekandevõrk, ideaalse ja reaalse tarbija võrdlus .....	34
2.11 Mõõtetulemuste statistiline analüüs elektritarbimise ja toitepinge kvaliteedi uurimisel .....	35
<b>3 Toitepinge kvaliteet Eesti ettevõtetes, analüüsi eesmärgid ja meetodika, mõõtetulemused, olukord ja probleemid</b> .....	38
3.1 Sissejuhatus .....	38
3.2 Toitepinge kvaliteedi parameetrid ja pingekvaliteedi standardid .....	38
3.3 Toitepinge sagedus .....	40
3.4 Toitepinge suurus, pingetase, pingetaseme analüüsi meetodika .....	41
3.4.1 Toitepinge suurus, nimipinge, pinge kvaliteeditasemed .....	41
3.4.2 Pingetase ehk pingeniivo, selle keskväärtus ja hajumise ulatus ....	44
3.4.3 Toitepinge suuruse mõõtetulemuste analüüsi eesmärgid ja arvulised ning graafilised parameetrid .....	46
3.4.4 Pingetaseme mõõtetulemuste analüüsi meetodika, toitepinge erinevad jaotuskõverad .....	47
3.5 Toitepinge taseme ehk pingeniivo mõõtetulemused .....	49

3.6 Lühiajalised pingehälbed – pingelohud ja pingemuhud, nende põhjused ja registreerimine .....	54
3.6.1 Pingelohud .....	55
3.6.2 Pingehälvete ulatuse-kestuse diagramm .....	57
3.6.3 Pingehälvete mõõtetulemused .....	58
3.7 Harmoonilised moonutused toitepinges ja toitevoolus .....	61
3.7.1 Harmoonilised pinged ja voolud .....	61
3.7.2 Pinge ja voolu harmooniliste moonutustegurid ja seosed .....	62
3.7.3 Nõuded pinge harmooniliste moonutuste osas .....	63
3.7.4 Pinge harmooniliste moonutuste mõõtetulemused .....	63
3.8 Toitepinge muutustega seotud valguse värelus ehk flikker .....	67
3.9 Toitepinge asümmeetria ja mõõtetulemused .....	70
3.10 Kokkuvõte ja järeldused .....	73
3.10.1 Pingetase ja selle hajuvus .....	73
3.10.2 Lühiajalised pingehälbed .....	74
3.10.3 Pinge harmoonilised moonutused .....	75
3.10.4 Pinge värelus ja asümmeetria .....	75
<b>4 Toitepinge kvaliteedi mõju elektritarbimisele ja seadmetele ning sellekohased uurimismetoodika täiendused .....</b>	<b>76</b>
4.1 Toitepinge kvaliteedi mõju elektriseadmetele ja elektritarbimisele .....	76
4.1.1 Toitepinge nivoo probleemi aktuaalsus ja pingeniivo reguleerimise vahendid .....	77
4.1.2 Toitepinge nivoo mõju võimsuskadudele liinides, trafodes ja mootorites .....	78
4.1.3 Toitepinge harmooniliste moonutuste mõju tarbijatele .....	80
4.1.4 Harmoonilised lisakaod elektriseadmetes .....	83
4.1.5 Pingete asümmeetria mõju võimsuskadudele elektriseadmetes .....	86
4.1.6 Pingelohkude mõju elektriseadmetele ja nende vähendamise võimalused .....	87
4.2 Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse tarbimise sõltuvus pingeniivoost ja selle katseline määramine .....	89
4.2.1 Aktiiv- ja reaktiivkoormuse staatilised mudelid .....	89
4.2.2 Aktiivvõimsuse ja reaktiivvõimsuse pingesõltuvuse määramise katseline meetodika .....	91
4.2.3 Asünkroonmootori toitepinge, momendi, pöörlemissageduse ning kasuteguri vahelised seosed .....	95
4.2.4 Optimaalse pingeniivo ja jaotuskõvera valik ettevõtte elektrisüsteemis .....	97
4.3 Harmoonilised lisakaod 0,4 kV elektrisüsteemides ning nende arvutuslik ja katseline määramine .....	99

4.3.1 Harmoonilised lisakaod 0,4 kV elektrisüsteemides .....	99
4.3.2 Harmooniliste lisakadude arvutamine elektrisüsteemis – trafodes, mootorites, kondensaatorites ja liinides .....	99
4.3.3 Harmooniliste lisakadude katselise määramise meetodika 0,4 kV elektrisüsteemis .....	101
4.4 Kokkuvõtte ja järeldused .....	105
<b>5. Reaktiivvõimsuse kompensatsioon kondensaatorseadmetega .....</b>	<b>106</b>
5.1 Kondensaatorseadmete kasutamise eelised .....	106
5.2 Kondensaatorseadmete kasutamise puudused .....	107
5.3 Reaktiivvõimsuse kompensatsiooniga seotud põhimõisted .....	108
5.4 Võimsused ja võimsustegur harmooniliste moonutuste korral .....	108
5.5 Võimsuskaod reaktiivvõimsuse ülekandmisel .....	110
5.6 Aktiiv- ja reaktiivvõimsus kondensaatori lülitamisel elektrisüsteemi, juhul kui arvesse võetakse pingemuutus .....	111
5.7 Trafo pingemuutus sõltuvalt faasinihkenurgast ja trafo lühispingest .....	113
5.8 Kondensaatorseadmest tingitud pingemuutuse arvutamine trafo koormuseta olukorras .....	119
5.9 Kondensaatorseadmest tingitud pingemuutuse arvutamine koormusega trafo puhul .....	120
5.10 Pingemuutuse registreerimine ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides .....	122
5.11 Reaktiivvõimsuse kompensatsiooni majanduslik tasuvus .....	125
5.12 Automaatsed kondensaatorseadmed .....	128
5.12.1 Kondensaatorid .....	128
5.12.2 Harmoonilised lisakaod kondensaatorites .....	129
5.12.3 Harmoonilistest moonutustest lähtuvad lisatingimused kondensaatoritele .....	130
5.12.4 Automaatsed kondensaatorseadme valiku lähteandmed .....	131
5.12.5 Automaatse kondensaatorseadme võimsuse valiku kriteeriumid ..	132
5.12.6 Automaatse kondensaatorseadme võimsuse valiku näiteid .....	134
5.12.7 Automaatse kondensaatorseadme regulaatori sätete valik .....	139
5.12.8 Kondensaatorseadme koostisosade valik .....	140
5.12.9 Siirdeprotsessid kondensaatori sisselülitamisel .....	140
5.13 Kokkuvõtte ja järeldused .....	141
<b>6. Harmoonilised voolud ja pinged 0,4 kV elektrisüsteemides, ettevõtte elektrisüsteemi mudel voolude ja pingete arvutamiseks .....</b>	<b>143</b>
6.1 Ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteem ja selle aseskeemi parameetrid .....	143
6.2 Ettevõtte elektrisüsteemi ekvivalentne näivtakistus ja sageduskarakteristik .....	147
6.3 Paralleelresonants ettevõtte 0,4 kV elektrisüsteemis .....	149



6.4 Voolu ja pinge harmooniliste spektrite ja resonantside uurimine elektrisüsteemides, mis sisaldavad kondensaatoreid .....	152
6.4.1 Harmooniliste voolude, pingete ja resonantsitingimuste mõõtetulemused moonutuste madala taseme korral .....	153
6.4.2 Harmooniliste voolude, pingete ja resonantsitingimuste mõõtetulemused moonutuste keskmise taseme korral .....	157
6.4.3 Harmoonilistest voolude, pingete ja resonantsitingimuste mõõtetulemused moonutuste kõrge taseme korral .....	162
6.4.4 Järeldused harmooniliste voolude, pingete ning vooluresonantsi tingimuste uurimisest erineva moonutuste tasemega elektrisüsteemides .....	167
6.5 Metoodika kirjeldus harmooniliste voolude, pingete ning resonantside uurimiseks 0,4 kV elektrisüsteemides .....	169
6.6 Harmooniliste moonutuste vähendamise võimalused .....	171
6.7 Sildavad passiivfiltrid ehk filterkondensaatorseadmed .....	171
6.7.1 Passiivfiltri parameetrite ja koosteosade valik .....	173
6.7.2 Pingete, voolude ja võimsuskadude arvutamine passiivfiltris .....	174
6.7.3 Passiivfiltri pingete ja voolude mõõtmine ja analüüs .....	175
6.8 Ettevõtte elektrisüsteemi mudel pingete, voolude ja sageduskarakte ristiku arvutamiseks vooluharmooniliste arvessevõtmisega .....	178
6.9 Kokkuvõte ja järeldused .....	180
KASUTATUD KIRJANDUS .....	181
PUBLIKATSIOONID .....	187
KOKKUVÕTE .....	189
ABSTRACT .....	192
LISA A Elulookirjeldus .....	198
LISA B Curriculum Vitae .....	201
LISA C Näiteid toitepinge kvaliteedi parameetrite mõõtetulemustest .....	204

# 1 Elektritarbimise olukord ja arengud Eestis, probleemide püstitus ja töö eesmärgid

## 1.1 Sissejuhatus

Elektrienergia tarbimine kogu maailmas kasvab pidevalt, tarbimise kasvukiirus on ligikaudu 2% aastas [2]. Seetõttu maailma paljudes piirkondades elektrienergiat ei jätku. Samas on elektrienergia kõige kvaliteetsem energialiik, mida inimene praegu kasutab ja see väärib võimalikult säästlikku kasutamist. Juba praegu ei jätku ainult fossiilsetest kütustest, kasutatavast tuumakütusest ja taastuvenergiast selleks, et varustada maailma kõiki tarbijaid elektrienergiaga soovitud mahus. Samuti ei ole lähematel aastakümnetel, aga võibolla isegi mitte sel sajandil näha uut tüüpi tuumaenergia allikate kasutusvõimalusi. Ilmselt võiksime ja saaksime elada ka palju säästlikumalt, paraku tahame sageli osa saada paljudest olemasolevatest ja uutest tarbimisvõimalustest. Inimkonna arengusse ja energiatarbimisse on kätketud omamoodi vastuolu või paradoks, millele on osutanud näiteks akadeemik Karl Rebane [83]. Vastuolu seisneb selles, et evolutsiooni käigus, ja eriti viimastel sajanditel, on kiiremini ja agressiivsemalt arenenud ja laienenud just need kultuurid, elulaadid ja rahvad, kes tarbivad rohkem energiat (või ka laiemalt – tarbivad rohkem loodusressursse) ja ühtlasi ka rohkem saastavad keskkonda. Lihtsaid lahendusi sellele vastuolule ilmselt pole. Selline olukord võib pikkamööda muutuda ainult juhul, kui muutuvad inimeste ja rahvaste väärtushinnangud, kui omamist ja tarbimist ideaaliks pidavad väärtushinnangud ja käitumisharjumused asenduvad millegagi, kus ideaaliks peetakse näiteks inimeste kõrgeid moraalseid ja vaimseid omadusi.

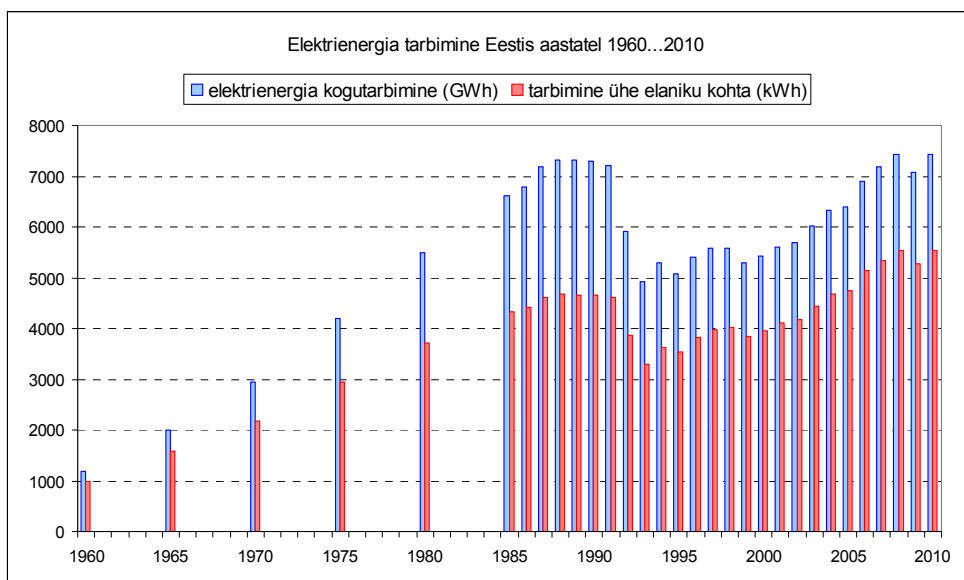
**Energiatarbimise kasvukiiruse vähendamisel nii kogu maailmas kui ka Eestis on oluline tegevussuund energiakasutuse tõhusus ja energia kokkuhoid, mida peab kõige olulisemaks teguriks ka Maailma Energeetikanõukogu WEC (*World Energy Council*) ja mida rõhutati WEC konverentsil „Ratsionaalne energeetika – Eesti positsioon maailmas”, mis toimus Tallinnas 12.01.2011. Käesolev töö ongi pühendatud elektrienergia tõhusa ja säästliku kasutamise probleemide uurimisele ja sellekohase uurimismetoodika täiustamisele.**

## 1.2 Elektritarbimise ja elektrikvaliteedi olukord Eestis aastatel 1992...2010

Eestis on viimase iseseisvusperioodi vältel (aastatel 1992...2010) harjutud sellega, et elektrienergiat on võimalik tarbida piiramatult. Elektriijaamade kütus – põlevkivi – on kohalik loodusressurss, omast käest võtta, ja ülekandevõrk pingel 110...330 kV on välja ehitatud Nõukogude Liidu perioodil aastatel 1960...1990 suure võimsusvaruga. Seetõttu ei ole Eesti elektritarihid viimase 20 aasta vältel kogenud sellist olukorda, kus elektrienergiat mingil ajahetkel ei piisa. Viimased mälestused energiatarbimise säästurežiimidest on jäänud aega, kus Eesti kuulus Nõukogude Liidu koosseisu. See on olnud Eesti tarbijaile, ettevõtetele ja ühiskonnale mugav ja samas ka uinutav. Sellises olukorras võib kergesti unustada, et energiaallikad on vägagi piiratud ning elektrienergia hind on ühiskondlik-poliitiliste ja rahvusvaheliste

kokkulepete tulemus ning ei kajasta kasutatavate kütuste ammendumust ja kõiki keskkonnamõjusid. Odav elektrienergia ning väljaehitatud 110 kV põhivõrk on olnud isegi uute ettevõtete Eestisse rajamise üheks argumendiks (näiteks Estonian Cell Kundas). Elektrienergia kasutamise tõhususele ja säästlikkusele pole pööratud piisavat tähelepanu. Kuivõrd elektrienergia hind Eestis on pidevalt kasvanud, siis on viimasel aastakümnel ettevõtete huvi elektritarbimise uurimise ja elektrikulude optimeerimise vastu suurenenud.

Elektritarbimise kogumaht ja tarbimine ühe elaniku kohta Eestis viimase 50 aasta vältel on vastavalt Statistikaameti andmetele [98] toodud joonisel 1.1.

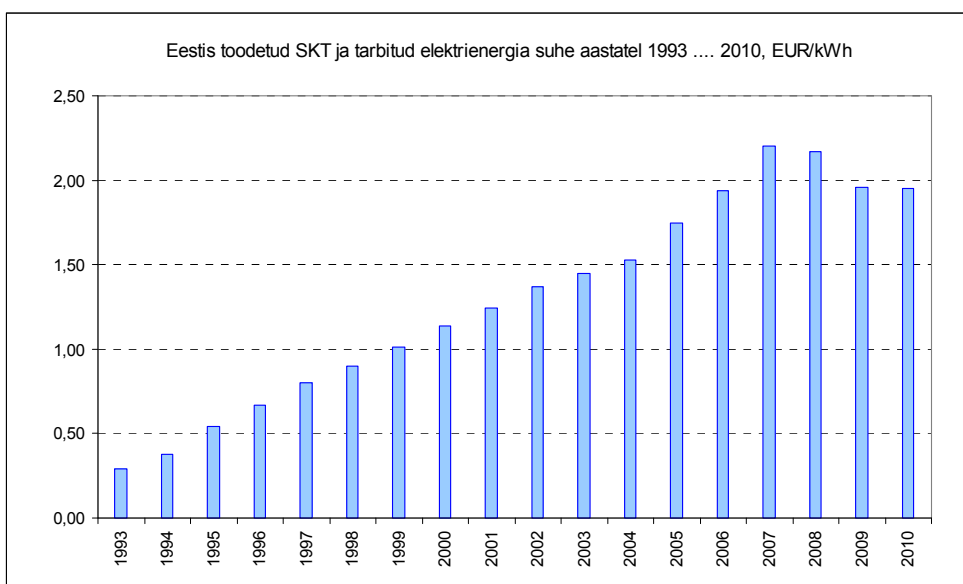


Joonis 1.1. Elektrienergia tarbimine Eestis aastatel 1960...2010

Nagu selgub joonisel 1.1, kasvas energiatarbimine Nõukogude Liidu perioodil pidevalt kuni 1987-nda aastani, edasi stabiliseerus ja seejärel langes seoses Eesti taasiseseisvumisega aastatel 1991...1993. Selle põhjuseks oli tööstustoodangu ja tööstusettevõtete tarbimise oluline langus, mis tulenes suurte tööstusettevõtete toodangumahtude vähenemisest või ettevõtete sulgemisest, ettevõtete omandisuhete ümberkorraldamisest, aga samuti põllumajanduslike ettevõtete tarbimise järsust vähenemisest. Eesti taasiseseisvumise järel aastatel 1991 kuni 1997 oli ettevõtetel väga palju erinevaid probleeme seoses tootmise ja turustamise arendamise ja ümberkorraldamisega. Lagunes ka enamasti kolhoose ja sovhoose ning sellega seoses kadusid paljud suurfarmid jm põllumajandustarbijad. Elektrienergia tootmisvõimsust oli Eestis sel ajal ca 3200 MW, tarbimine oli talvise maksimumi ajal ca 1400 MW, seega ületas tootmisvõimsus tarbimist ca 2...2,5 korda. Kuna ka ülekandevõrk oli välja arendatud 2...3 korda suurematele võimsustele, siis oluliselt madalama tarbimise tingimustes oli pingekvaliteet hea. Erandiks olid pikkade (üle 1 km) madalpingeliinide lõpus asuvad majapidamised, kus oli probleeme liiga

madala pingetaseme, suurte pingehälvete ja neutraaljuhi liiga suurest takistusest tingitud pingete asümmeetriaga. Elektribimist ja toitepinge kvaliteeti uuriti vähesel määral. Huvi nende probleemide vastu elavnes märgatavalt alates aastast 1996, sel aastal toimus ka esimene elektrikvaliteedi valdkonna rahvusvaheline konverents Eestis. Sellest ajast alates on Eestis ilmunud ka mitmeid vastava valdkonna uurimusi [80, 81, 82, 103].

Väike langus elektribimises oli veel 1999-ndal aastal seoses nn “vene rahanduskriisiga”, kui paljudel ettevõtetel kadus võimalus oma toodangut Venemaal müüa. 1990-ndate lõpust alates hakkas elektribimine pidevalt tõusma. Tõusu kiirus aastatel 2001...2008 on olnud ca 3% aastas. Elektribimise tõhusus, toitepinge kvaliteet ja elektri varustuskindlus on saanud järjest suurema tähelepanu osaliseks. Selle põhjuseks on asjaolud, mis tulenevad Eesti majanduse struktuuri ümberkohanemist, elektrihinna tõusust, tootmiseladmete kiirest tehnilisest arengust ja nende tundlikkusest pinge kvaliteedi suhtes (jõuelektroonika, muundustehnika ja infotehnika seadmete laialdane kasutuselevõtt). Oluline tegur elektri kasutamise tõhususe hindamisel on elektribimise efektiivsus, mida iseloomustab sisemajanduse kogutoodangu ja selle tootmiseks kulutatud elektrienergia suhe. See suhe kasvas aastatel 1992...2007, kuid ei ole viimastel aastatel enam suurenenud, nagu selgub jooniselt 1.2.



Joonis 1.2. Eesti SKT tarbitud elektrienergia kohta aastatel 1993...2010

Ettevõtete elektribimist ja elektrivarustuse kvaliteeti Eestis on mõjutanud mitmed tegurid – elektribimise maht ja struktuur, muutunud elektriseadmed ja nende kasutusala, toitepinge kvaliteedi suhtes tundlikud tootmiseladmed, elektrienergia hind. Järgnevalt on neid tegureid lühidalt iseloomustatud.

**Esimene tegur – kasvav elektritarbimine.** Elektritarbimine on Eestis peale taasiseseisvumist pidevalt kasvanud alates 1990-ndate lõpust, kusjuures suhteline elektritarbimine ühe elaniku kohta ületab alates 2006-st aastast juba selle kõrgtaseme, mis oli 1980-ndate lõpul. Oma osa suhtelise elektritarbimise kasvus on siin Eesti elanike arvu pideval vähenemisel, mis on viimastel aastatel siiski pidurdunud.

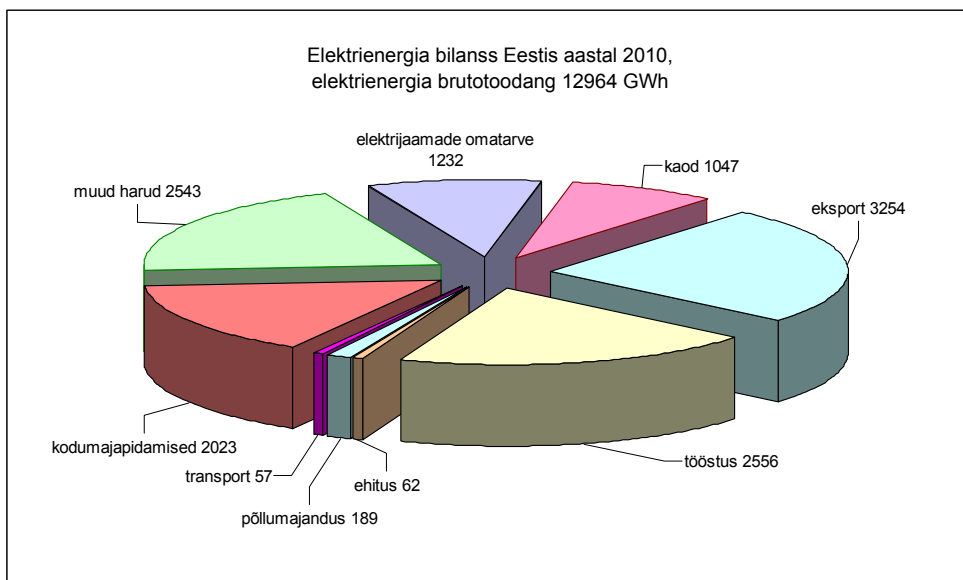
**Teine tegur – muutuvad elektriseadmed.** Elektriseadmed olid varem lihtsama ehitusega ning vähem tundlikud pingekõvera kuju ja pinge suuruse hälvete suhtes. Samuti oli suhteliselt väike ebalineaarse pinge-voolutunnusjoonega seadmete arv ja koguvõimsus. Kui mujal maailmas algas sagedusmuundurite võidukäik juba 1980-ndatel, siis Eestis polnud nimetamisväärsel hulgal sagedusmuundureid, CNC-pinke, robotiliine jms kuni 1990-ndate keskpaigani. Kodutarbimises olid põhilised elektritarvitid vaid kütteseadmed, elektripliidid ja hõõglambid. Tööstusettevõtetes ja ühiskondlikes hoonetes oli muundurite osa väike, teatava osa ebalineaarsetest tarbijatest moodustasid keevitusseadmed ja valgustid. Alates 1990-ndate keskpaigast hakkas muundurite osa nii tööstuses kui ka sotsiaalse infrastruktuuri ettevõtetes kiiresti kasvama, ajamite juhtimiseks hakati kasutama sagedusmuundureid, luminofoorvalgustites tulid kasutusele elektroonseid süütuurid (muundurid ehk ballastid), samuti kompaktluminofoorlambid, büroodesse ja kodudesse tuli IT-tehnika, koduelektronikaseadmete osakaal hakkas kiiresti tõusma. Kasutusele tuli hulgaliselt uute funktsioonidega ja muunduritega varustatud elektriseadmeid ning uusi elektriseadmete kasutusalasid, näiteks soojuspumbad, kliimaseadmed, bürooseadmed, infotehnika, sidetehnika, käsitööriistad jpm.

Ettevõtete seadmepargi uuendamine intensiivistus Eestis eriti aastatel 2002...2008. Viimasel seitsmel–kaheksal aastal ehitatud büroo- ja kaubandushooned, hotellid ja tervisekeskused on oluliselt suurema elektriseadmete hulga ja koguvõimsusega ning ka elektrienergia tarbimisega kui varem ning nende tundlikkus elektrikatkestustele ja häiringutele on samuti suur. Pidevalt on kasvanud mittesiinuselise voolu tarbivate elektriseadmete hulk ja koguvõimsus [11, 30]. Mittesiinuselise kujuga volukõver sisaldab endas kõrgemaid harmoonilisi komponente, mis põhjustavad ka toitepinge siinuskõvera kuju moonutusi. Need toitepinge siinuskõvera moonutused põhjustavad täiendavaid kadusid kogu elektrisüsteemis, sh mootorites, trafodes, kaablites, kondensaatorites ning lisaks ka häiringuid side- ja juhtsüsteemide töös. On üldine suund nii Eestis kui ka teistes riikides, et pingekvaliteediga seotud probleemide hulk ja nende mõju ulatus kasvab, kusjuures see puudutab nii tarbijaid kui ka võrguettevõtteid, [91].

**Kolmas tegur – elektrienergia kasvav hind.** Üha kasvav elektrienergia hind motiveerib ettevõtteid rohkem tähelepanu pöörama elektrienergia kvaliteedile ja tarbimisele optimeerimisele. Pärast Eesti taasiseseisvumist oli elektrienergia hind suhteliselt madal ning ei motiveerinud ei tarbimise uuringutele ega säästlike lahenduste rakendamisele. Sel perioodil propageeriti näiteks öise elektrienergia kasutamist nii eramute kui ka bürooruumide kütteks. Elektrienergia hind on aga 18 aasta vältel

pidevalt tõusnud ning see on otseselt suurendanud vajadust ja ettevõtete otsesest huvi elektrikulude optimeerimise ja elektritarbimise vähendamise suunas.

**Neljas tegur – muutused elektritarbimise struktuuris.** Pärast Eesti taasiseseisvumist 1991. aastal toimus alguses elektritarbimise järsk vähenemine. See langus tuli suurte tööstusettevõtete ja samuti põllumajandusettevõtete tarbimise järsust vähenemisest. 1990-ndate lõpuks jõudis elektritarbimine oma madalaimale tasemele ning edaspidi hakkas juba tõusma. Elektrienergia brutotoodang ning tarbimine erinevate tarbijagruppide lõikes Eestis aastal 2010 on toodud joonisel 1.3. Sellest nähtub, et tööstustarbimine koos ehituse, transpordi ja muude tegevusharudega moodustab ligikaudu 73% kogu tarbimisest ja kodumajapidamised ca 27% tarbimisest. Põllumajanduse osa on vähenenud, muud harud, sh teenindus, kasvanud.



Joonis 1.3. Elektrienergia bilanss ja tarbimise jaotus Eestis aastal 2010

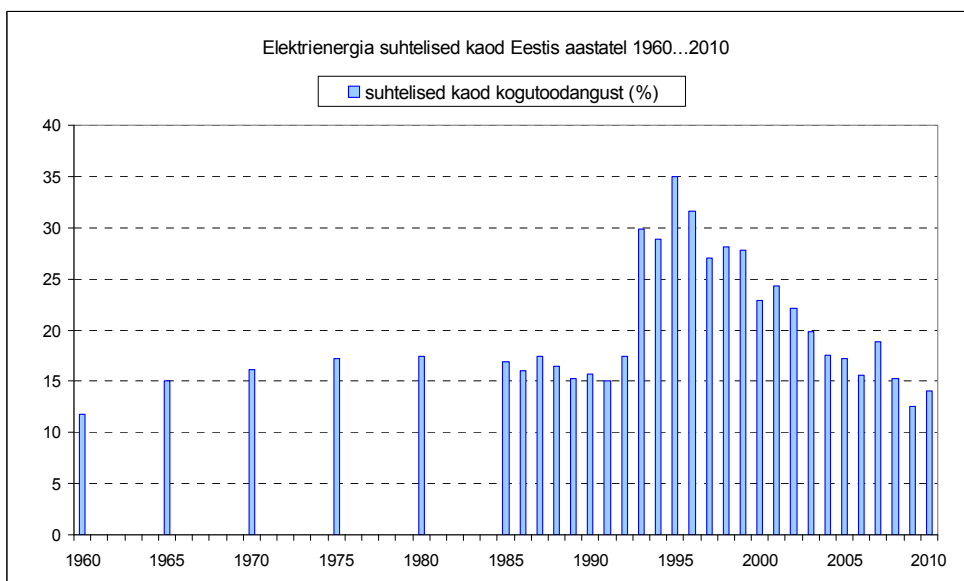
**Viies tegur – elektrisüsteemide talitus lubatava võimsuspiiri piirkonnas.** Avatud elektrituru tingimustes ja olukorras, kus elektrit tootev ja müüv ettevõtte on kasumit taotlev äriühing, on võimalik, et püütakse käitada seadmeid, alajaamu ja liine võimalikult lubatava võimsuspiiri lähedal. Heade majandusnäitajate taotlemisel on ka oht vähendada hoolduskulusid miinimumini ning lükata edasi elektri varustuskindluse suurendamise ja elektrikvaliteedi tugevdamisega seotud investeeringuid jaotus- ja ülekandevõrku.

**Kuues tegur – soov suurendada elektrimüüki.** Üks võimalik tegur, mis on mõjutanud toitepinge kvaliteeti, on elektrimüüja soov suurendada elektrimüüki. Elektritarbimist ergutati näiteks 1990-ndate keskel, julgustades tarbijaid üle minema elekterküttele. Pinge tõstmine 6...20 kV jaotusvõrgus parendab küll kaugemate tarbijate pingetaset, kuid suurendab ka energiatarbimist. Tehniliselt on see väga lihtne, kasutades näiteks 110/35/10 kV trafo astmelülitit. Elektrimüügi ettevõttele

tähendab kõrgem pinge suuremat energiamüüki ja teatud juhtudel isegi väiksemaid suhtelisi liinikadusid. Seega, kuigi toitepinge nivoo vastab standardile EVS-EN:50160, tähendab see ettevõtetele (tarbijatele) sageli optimaalsest kõrgemat pingeniivod, millega kaasneb ka suurem tarbimine.

**Seitsmes tegur – elektrivõrkude rekonstrueerimine ja kadude vähendamine.**

Viimase kümne aasta jooksul on jaotus- ja põhivõrgud rekonstrueerinud hulgaliselt alajaamu ja liine, paigaldanud uusi trafopunkte, eriti väiksema võimsusega trafopunkte (võimsusega 25 kVA kuni 100 kVA) ning suurendanud võrgu läbilaskevõimsust ja töökindlust. Selle tulemusena on toitekatkestuste arv ja katkestuste summaarne aeg vähenenud ning pingeniivoo jaotusvõrgus on kõrgem ja stabiilsem. Elektrienergia suhtelised kaod on aastatel 1995...2010 küll oluliselt vähenenud, nagu selgub jooniselt 1.4, kuid siiski ca kaks korda kõrgemad kui läänepoolsetes naabermaades.



Joonis 1.4. Elektrienergia suhtelised kaod Eestis aastatel 1960...2010

Käesoleva töö kontekstis hõlmab energiakasutuse tõhusus ja energia kokkuhoid ettevõtetes võimsuskadude vähendamist ning optimaalset (mõistlikku) tarbimist, seega niisuguste tehniliste abinõude ja võtete kasutamist, mis kindlustab ettevõtte tööks vajalikud elektriseadmete funktsioonid väiksema energiakulu ja väiksemate võimsuskadudega. Tõhusa ja säästliku elektritarbimise olukorras täidavad ettevõtte seadmed vajalikke funktsioone väiksemate võimsuskadudega, elektrienergia kulu ettevõttes on väiksem, elektriline koormus ajas on ühtlasem ja toitepinge kvaliteet on piisavalt hea – optimaalne. Kui toitepinge on optimaalse kvaliteediga, kuumenevad elektriseadmed vähem ning nende tööiga on ka pikem.

Maailma kogemused näitavad, et keskmine energiakadu elektrivõrkudes peaks olema alla 10% kogutoodangust, kusjuures majanduslikult optimaalseks kadude tasemeks loetakse arenenud maades ligikaudu 5%, [80, 82]. Eesti elektrivõrkudes ületavad kaod nimetatud taset seni ca kaks korda.

Eestis tarbitav summaarne võimsus on aasta keskmisena ca 1500 MW. Kogu see võimsus läbib ülekandevõrgu ja jaotusvõrgu trafosid ja kasutatakse ära pingel 0,4 kV ja 6...10 kV. Hinnanguliselt 60...65% sellest võimsusest tarbivad elektrimootorid ja ajamid ning 20...25% valgustid, [11, 30]. Seega on energiakasutus väga oluline, missugused on tegelikud võimsuskadud trafodes, mootorites, liinides, ajamites ja valgustites.

Alates 1990-ndate keskpaigast on harmooniliste moonutuste tase toitevoolus ja -pinges pidevalt suurenenud. Harmoonilised moonutused põhjustavad lisakadusid elektriseadmetes – trafodes, mootorites, kaablites ja kondensaatorites. Lisakadude tõttu tõuseb nende temperatuur ja väheneb tööiga. Kuna harmoonilised moonutused on kõige suuremad just madalpingel, siis on harmooniliste lisakadude uurimine oluline ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides. Harmooniliste moonutuste mõju uurimisele on pühendatud arvukalt erineva maade autorite töid, [4, 5, 12, 13, 14, 21, 29, 32, 55, 105, 107, 109].

Elektritarbimise optimeerimise ning elektrienergia kadude vähendamise seotud probleeme on Eestis uuritud jaotus- ja ülekandevõrkudes, mille uurimistulemused on kajastatud töödes [72, 73, 80, 81, 82, 103, 106]. Uurimistööde eesmärgiks on olnud saavutada kadude optimaalne tase, kus optimaalseks peetakse sellist kadude väärtust, mille puhul pole majanduslikult põhjendatud nende edasine vähendamine. Vähem on uuritud elektritarbimise optimeerimisvõimalusi tarbija tasandil. Tarbijad võib jagada kahte gruppi – kodutarbijad ja äritarbijad ehk ettevõtted. Kui kodutarbija puhul määravad elektritarbimise mahu kasutatavad elektriseadmed ja elektriseadmete kasutamise harjumused (pingekvaliteedi parameetreid kodutarbija ise mõjutada ei saa), siis ettevõtete puhul on olemas terve rida tehnilisi ja korralduslikke võimalusi, et optimeerida elektritarbimise ja elektrikulude suurus ning mõjutada toitepinge kvaliteeti.

Üldjuhul on ettevõtted huvitatud elektrikulude säästust ning on valmis ka omapoolseteks elektritarbimise uuringuteks, seadmepargi täiendusteks või muudatusteks, et oma elektritarbimist vähendada. Lisaks huvitatusel on ettevõtetel olemas ka teatud majanduslikud ja tehnilised vahendid elektritarbimise optimeerimiseks ning keskmise suurusega ja suurtes ettevõtetes ka elektriala või tehnikaala spetsialistid (elektrikud, käidujuhid, tehnikajuhid, hooldusjuhid), kes saavad vajalikke mõõtmisi, analüüse ja ümberkorraldusi algatada või läbi viia.

Elektrivarustuse ja -tarbimise optimeerimisel on ettevõttepoolne initsiatiiv väga oluline, kuna elektrienergia müügiettevõtte ei ole energia müügikoguse vähenemisest loogiliselt huvitatud. Samas, vaadates kogu ahelat elektrienergia tootmisest, ülekandmisest ja jaotamisest kuni tarbimiseni, on ilmselt kogu ühiskonnale hea, kui tarbimine on tõhus ja säästlik iga tarbija lõikes.



Käesolev töö ongi suunatud ettevõtete elektritarbimise uurimisele, optimeerimisele ja tõhususe suurendamisele. Optimeerimine eeldab elektritarbimise ning toitepinge kvaliteedi parameetrite registreerimist ja analüüsi, mida võib nimetada ettevõtete elektritarbimise uurimiseks. Uurimistulemuste alusel saab anda soovitusi elektri-varustuse optimeerimiseks ja energiatarbimise vähendamiseks.

Käesolevas töös esitatakse ülevaade ettevõtete elektritarbimise uurimise ja optimeerimise meetodikast ning elektrikulude säästu võimalustest. Samuti antakse ülevaade toitepinge kvaliteedi parameetritest ning neid reguleerivatest standarditest, toitepinge kvaliteedi mõjust energiatarbimisele ja võimsuskadudele. Töös käsitletakse põhilikult reaktiivvõimsuse kompensatsiooni, selle mõju pingeniwoole ja harmoonilistele moonutustele ning kondensaatorseadmete valiku ja kasutamiseiga seotud probleeme.

Töö esimeses peatükis on toodud ülevaade elektritarbimise olukorrast, tarbimise mahust, struktuurist ja elektrikasutamise tõhususest Eestis aastatel 1992...2010 ning muutustest selles valdkonnas. Peatüki lõpus on toodud püstitatud probleemid ja töö eesmärgid.

Töö teises peatükis on toodud ettevõtete elektritarbimise ja elektrivarustuse valdkonna seosed ja uurimise eesmärgid, toitepinge kvaliteeti mõjutavad tegurid ja olemasolev meetodika elektritarbimise uurimiseks kasutades selleks aktiiv- ja reaktiivvõimsuse koormusgraafikuid ja toitepinge kvaliteedi uurimiseks vastavate arvuliste ja graafiliste parameetrite alusel.

Töö kolmandas peatükis on antud ülevaade põhilistest toitepinge kvaliteedi parameetritest, vastavatest mõõtetulemustest ja toitepinge kvaliteedi uurimismetodika täiendustest Eesti ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides, mis on saadud aastatel 2000...2010 erinevates ettevõtetes ja paikades üle Eesti.

Töö neljas peatükk käsitleb toitepinge kvaliteedi erinevate parameetrite mõju võimsustarbimisele, võimsuskadudele ja elektriseadmetele. Põhjalikumalt on käsitletud toitepinge nivoo ja harmooniliste moonutuste mõju võimsuskadudele. Esitatud on kaks meetodilist täiendust toitepinge nivoo ja harmooniliste moonutuste mõju katselisel teel uurimiseks 0,4 kV elektrisüsteemides.

Töö viiendas peatükis on käsitletud reaktiivvõimsuse kompensatsiooni kondensaatorseadmetega, selle eeliseid ja puudusi, mõju pingeniwoole ja pingeniwoo hajumisele. On toodud uus meetodiline juhis automaatse kondensaatorseadme optimaalse võimsuse valikuks ning samuti kondensaatorseadme koostisosade valikuks arvestades ka pinge ja voolu harmooniliste moonutustega.

Töö kuues peatükk on pühendatud harmooniliste voolude ja pingete ning resonantside uurimisele ja vastava uurimismetodika edasiarendamisele ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides, mis sisaldavad automaatseid kondensaatorseadmeid, samuti filterkondensaatorseadmete (passiivfiltrite) töö ja mõju analüüsimisele. Peatüki lõpuosas on esitatud ka 0,4 kV elektrisüsteemi mudel ekvivalentse näivtakistuse, voolude ja pingete arvutamiseks vooluharmooniliste arvessevõtmisega.

### 1.3 Probleemide püstitus

Käesoleval ajal on Eesti nagu ka paljud teised riigid olukorras, kus elektrienergia tarbimine kasvab pidevalt ja samuti kasvab elektrienergia hind ning elektrikulude suhteline osa paljudes toodetes ja teenustes. Tehnilised kaod Eesti madalpinge jaotusvõrkudes on suhteliselt suured. Elektriseadmed muutuvad järjest keerukamaks ja tundlikumaks häiringutele toitepinges ning samal ajal mõjutavad ka ise tarbitava voolu ja pinge kvaliteeti. Kasvab mittelineaarse voolu- pinge tunnusjoonega seadmete osakaal ja nende koguvõimsus ning seega ka harmooniliste moonutuste osa voolus ja pinges. Tööstusettevõtete tootmisseadmed ning ka infrastruktuuri ettevõtted on järjest enam sõltuvad ja haavatavad elektrivarustuse ja toitepinge kvaliteedi hälvetest. Nende üldiste probleemide üheks lahendussuunaks on elektrikasutuse tõhususe ja säästlikkuse suurendamine ning elektritarbimise ja toitepinge kvaliteedi optimeerimine ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides. Siit tulenevad ka käesoleva uurimistöökongkreetsed probleemid.

**1. probleem.** Kaasaegsete mõõtevahenditega, sh ettevõtetes olemasolevate elektroonsete arvestitega on võimalik hõlpsasti koguda väga suur hulk mõõteandmeid elektritarbimise ja toitepinge kvaliteedi kohta. Kahjuks on need mõõteandmed reeglina mitteülevaatlikud ja ilma analüüsita ebasobivad järelduste tegemiseks ja soovitude andmiseks ettevõtetele. Ettevõtted vajavad soovitusi, kuidas oma elektritarbimise efektiivsust suurendada ja energiakadusid vähendada, mida saab või tuleb oma elektrisüsteemis ette võtta. Olemasolev analüüsimeetodika on puudulik ja ei rahulda ettevõtteid kui tarbijaid. Ettevõtetel on vaja terviklikku meetodikat, milliseid lähteandmeid on vaja koguda, mida, kuidas ja kus mõõta ning kuidas saadud mõõteandmeid analüüsida ja esitada.

**2. probleem.** Ettevõtetel puudub ülevaade pingekvaliteedi parameetrite tasemest, nende parameetrite hajumisest ja parameetrite mõjust elektritarbimisele oma madalpinge elektrisüsteemides. Kuna need elektrisüsteemid asuvad jaotusvõrgule kuuluvatest kommertsarvestitest ja liitumispunktidest tarbija poolel, siis energiamüüja ja jaotusvõrk pole reeglina huvitatud pinge kvaliteedi parameetritest tarbija süsteemis ja neid parameetreid ei registreeri ega analüüsi. Ettevõtetel endil aga pole enamasti ressursse, inimesi ega ka vahendeid, et neid probleeme iseseisvalt uurida. Vaja on meetodikat, mille järgi uurida ja analüüsida toitepinge kvaliteeti ning nende uurimistulemuste põhjal järeldusi teha.

**3. probleem.** Vähe on uuritud ettevõtete koormusi, sh koormusgraafikuid, eesmärgiga leida võimalusi elektrienergia ja rahaliste kulude kokkuhoiduks. Energiämüüjat ja jaotusvõrku see probleem ilmselt ei huvita, küll aga huvitab see tarbijaid – ettevõtteid. Praegu puudub ettevõtete spetsialistidele suunatud ülevaatlik ja sobiv meetodika koormusgraafikute registreerimiseks ja analüüsimiseks. Tuleb välja töötada soovitud koormusgraafikute registreerimiseks ja analüüsiks.

**4. probleem.** Reaktiivvõimsuse kompensatsioon kondensaatorseadmetega 0,4 kV elektrisüsteemides võib olla ettevõtetele nii kasulik kui ka kahjulik. Seda, kuidas kondensaatorseadmete kasutamine mõjutab pingekvaliteeti ja kuidas pingekvaliteet

sel juhul mõjutab elektritarbimist, on uuritud killustatult. On küll uuritud üksikute pingeparameetrite mõju tarbimisele ja kadudele, aga mitte kogu tarbimisega ja pingekvaliteediga seotud küsimuste ringi komplekselt. Näiteks reaktiivvõimsuse kompensatsioon on seotud nii pingetasemega ettevõtte elektrisüsteemis, pingetaseme hajumisega kui ka pinge ja voolu harmooniliste moonutustega. Seega tuleb pingekvaliteedi ja reaktiivvõimsuse kompensatsiooni probleemidele läheneda komplekselt ja töötada välja meetodika, kuidas leida optimaalne lahendus iga konkreetse juhu jaoks.

**5. probleem.** Puudub meetodika automaatse kondensaatorseadme võimsuse täpsustatud valikuks lähtudes ettevõtte tegelikust võimsustegurist ja reaktiivvõimsuse koormusgraafikust. Selline meetodika on ettevõtetele vajalik ja tuleb luua, et vältida kondensaatorseadmete võimsuse ülepaisutamist ja seega asjatuid kulutusi.

## 1.4 Töö eesmärgid

**1. eesmärk.** Koostada terviklik meetodika ettevõtete (äritarbijate) elektritarbimise ja toitepinge kvaliteedi uurimiseks, olukorra analüüsiks ja elektrikulude vähendamist võimaldavate soovitude andmiseks. Meetodika peab sisaldama juhiseid, milliseid lähteandmeid on vaja koguda, milliseid parameetreid elektrisüsteemis mõõta või registreerida, kuidas saadud mõõteandmeid analüüsida ja ülevaatlikult esitada ning kuidas selle analüüsi põhjal anda soovitud ettevõtete elektritarbimise optimeerimiseks ja elektrikulude vähendamiseks.

**2. eesmärk.** Koostada Eesti ettevõtete elektritarbimise üldiseloomustus koormuse muutumise ulatuse ja iseloomu, koormusgraafikute registreerimise ja analüüsi põhjal. Anda hinnang elektritarbimise olukorrale.

**3. eesmärk.** Uurida ja iseloomustada toitepinge kvaliteeti Eesti ettevõtete elektrisüsteemides. Uuritavad toitepinge kvaliteedi parameetrid on – pingetase, pingetaseme kõikumised, pingehälbed, harmoonilised moonutused pinges, värelus ehk flikker ja asümmeetria. Anda üldised hinnangud toitepinge kvaliteedi erinevate parameetrite tasemele. Töötada välja meetodika seoste määramiseks toitepinge kvaliteedi parameetrite ja elektritarbimise vahel.

**4. eesmärk.** Uurida reaktiivvõimsuse kompensatsiooni mõju elektritarbimisele, pingekvaliteedi parameetritele, pingetasemele, pingehälvetele, harmoonilistele vooludele ja pingetele ning vooluresonantsile 0,4 kV elektrisüsteemides. Koostada terviklik meetodika kompensatsiooni eeliste ja puuduste üheaegseks arvessevõtmiseks ning selle mõju hindamiseks madalpinge elektrisüsteemis.

**5. eesmärk.** Koostada meetodika automaatsete kondensaatorseadmete optimaalse võimsuse valikuks lähtudes ettevõtte elektrisüsteemi tegelikust võimsustegurist ja ettevõttes tarbitava reaktiivvõimsuse koormusgraafikust.

## 2 Üldkasutatav metoodika ettevõtete elektritarbimise ja toitepinge kvaliteedi uurimisel

### 2.1 Ettevõtete elektritarbimise uurimise ja optimeerimise eesmärgid

Elektrienergia tarbijad võib jagada kahte liiki – äritarbijad ja kodutarbijad. Ettevõtte kui äritarbija on antud töö kontekstis näiteks tootmis-, teenindus- või bürooetevõtte või ka avalike funktsioonidega asutus – kool, lasteaed, tervisekeskus, haigla jne. Teine elektritarbijate liik on kodutarbijad, keda antud töös ei ole uuritud. Kõigile ettevõtetele kui tarbijatele on ühine see, et kõik vajavad toimimiseks elektrienergiat valgustite, kütte, kliimaseadmete, ventilatsiooni, tootmisseadmete, bürooseadmete jne toiteks.

Ettevõtete elektritarbimise uurimisel võivad olla erinevad eesmärgid. Kõige lihtsamal juhul on ettevõtte huvitatud eelkõige elektrikulude kokkuhoiust, toitepinge kvaliteedi küsimused on teisejärgulised juhul, kui need otseselt ei põhjusta sagedasi tõrkeid ja häiringuid seadmete töös. Ettevõtete elektritarbimise uurimise eesmärke võib olla rohkem ja need võib välja tuua järgmiselt:

- ettevõtte elektrikulude ja elektritarbimise vähendamine.
- ettevõtte seadmete ja elektrisüsteemi tõrketu ja ohutu töö tagamine.
- võimsuskadude vähendamine ettevõtte elektrisüsteemis.
- elektrikulude jaotuse analüüs tootmis- või struktuuriüksuste lõikes.
- üksiku seadme või tootmisliini elektrikulude analüüsimine.
- uute täiendavate tarbijate paigaldamise võimaluste ja nende mõju väljaselgitamine.

Ettevõtte, kes plaanib pikemaajalist tegevust, on ilmselt huvitatud sellest, kuidas arendada oma elektrisüsteem välja nii, et investeeringud elektrisüsteemi ehitusse oleksid mõõdukad, jooksvad hoolduskulud võimalikult väikesed, süsteemi töökindlus ja toite varustuskindlus piisav, võimsuskaod süsteemis ja seadmetes väikesed ning toitepinge kvaliteet vähemalt hea. Samuti on ettevõtte huvitatud sellest, et aktiiv- ja reaktiivenergia tarbimine oleks säästlik ja elektrikulud võimalikult väikesed. Seega tuleb ettevõttel elektrikulude optimeerimisel pikemaajalises lõikes arvestada vähemalt viie olulisema funktsiooniga, kusjuures summaarne kulude tase või kõver (funktsioon) koosneb nende kulufunktsioonide (kõverate) summast, millel on ilmselt teatud miinimum. Need kuludõigud on:

- investeeringukulud ettevõtte elektrisüsteemi ja elektriseadmetesse (trafod, kaablid, jaotus- ja kaitseseadmed, kondensaatorseadmed, tootmiseseadmed);
- seadmete käidu-, hooldus- ja remondikulud;
- kulud võimsuskadudele elektrisüsteemis, liinides, trafodes ja seadmetes;
- aktiiv- ja reaktiivenergia kulud;
- katkestustest, pingehälvetest ja seadmete töö tõrgetest tingitud kulud.

## 2.2 Ettevõtte elektrikulude optimeerimisvõimalused

Elektritarbimise analüüsil pakub ettevõttele enamasti suurimat huvi just see, kuidas vähendada elektritarbimist ja elektrikulusid. Elektrikulude optimeerimisvõimalused on järgmised.

- Sobivate liitumistingimuste ja hinnapaketi valik.
- Optimaalse pingeniivo valik ettevõtte elektrisüsteemis, pingeniivo keskvaärtuse ja selle hajuvuse reguleerimine.
- Pingelohkude häiriva mõju vähendamine (sh käivitus- ja lühisvooludest tingitud pingelohkude piiramine).
- Reaktiivvõimsuse kompensatsioon kondensaatorseadmetega.
- Harmooniliste moonutuste piiramine pinges ja voolus.
- Voolukoormuste (liinivoolude) sümmetreerimine.
- Tipuvõimsuse hajutamine, koormusgraafiku täiteteguri parendamine.
- Elektritarbimise ja pingekvaliteedi seiresüsteemi kasutamine ettevõttes seadmete koormuse ning pingekvaliteedi jälgimiseks ja korrigeerimiseks.

Elektrikulud ettevõttes koosnevad mitmest komponendist:

- Püsitasu (võimsustasu, mis seatakse kas peakaitse rakendusvoolu järgi või tegeliku kasutusvõimsuse järgi, mis registreeritakse arvestiga kui  $P_{60max}$ ).
- Aktiivenergia tasu  $W_P$ , mis registreeritakse arvestiga kas ühes või kahes (vahel ka kolmes) tariifi ajatsoonis.
- Reaktiivenergia tasu  $W_Q$ , mis registreeritakse enamasti arvestiga või vahel ka arvutuslikult kindlaksmääratud protsendi alusel tarbitud aktiivenergiast.
- Muud elektrikulu komponendid (taastuenergia tasu, elektriaktsiis), mis arvutatakse tarbitud aktiivenergia alusel.

Elektrikuludest suurima osa moodustab tavaliselt tarbitud aktiivenergia  $W_P$ , kusjuures energia on ühes kalendrikuus integreeritud võimsus:

$$W_P = \int_{t_1}^{t_2} P(dt) \cdot \quad (2.1)$$

Graafiliselt kujutab kuu jooksul tarbitud energia endast võimsuskõvera alust pinda algusajaga kuu esimesel kuupäeval kell 00.00 ja lõpuajaga kuu viimasel kuupäeval kell 24.00. Selliselt registreerivad kaasaegsed arvestid kuus tarbitud energiakoguse. Ettevõtte poolt tarbitav aktiivvõimsus  $P$  koosneb kahest osast – kasulik võimsus ja võimsuskadod elektriseadmetes, kaablites ja trafodes:

$$P = P_{kasulik} + \Delta P_{kaod} \cdot \quad (2.2)$$

Kasulik võimsus on võimsus, mida kasutatakse mehaaniliseks tööks, kütteks, kuumutamiseks, jahutamiseks, ventilatsiooniks, valgustuseks jm. Kasulikku võimsust ei ole võimalik vähendada, sest sellega halveneks töö tootlikkus, töötingimused, ohutus, töö rütmilisus jne. Ka ideaalse töökorralduse puhul ei ole võimalik täiesti

vältida seadmete tühikäiku ja tööd alakoormusel. Seega võib kasuliku võimsuse puhul määrata teatud taseme, millest allapoole võimsust enam vähendada ei saa.

Aktiivvõimsuskaod on elektrienergia ülekandmise, energia muundamise, jaotamise ja kasutamisega seotud paratamatu nähtus. Mida väiksemad on kaod, seda parem. Reaalselt ei ole võimalik kadusid täiesti vältida, kuid on võimalik vähendada teatud optimaalse tasemeni. Kaod esinevad kõikides ettevõtte elektrisüsteemi osades ja seadmetes, sh trafod, kaablid, lülitusseadmed, mootorid, muundurid jne. Kaod on väiksemad, kui toitepinge kvaliteediparameetrid on lähedased nimisuurustele ning elektriseadmete koormusparameetrid (voolud, võimsused) on teatud optimaalses vahemikus (näiteks trafode koormus ca 40...60%, mootorite koormus 60...80%).

## 2.3 Elektrivarustus ja toitepinge kvaliteet

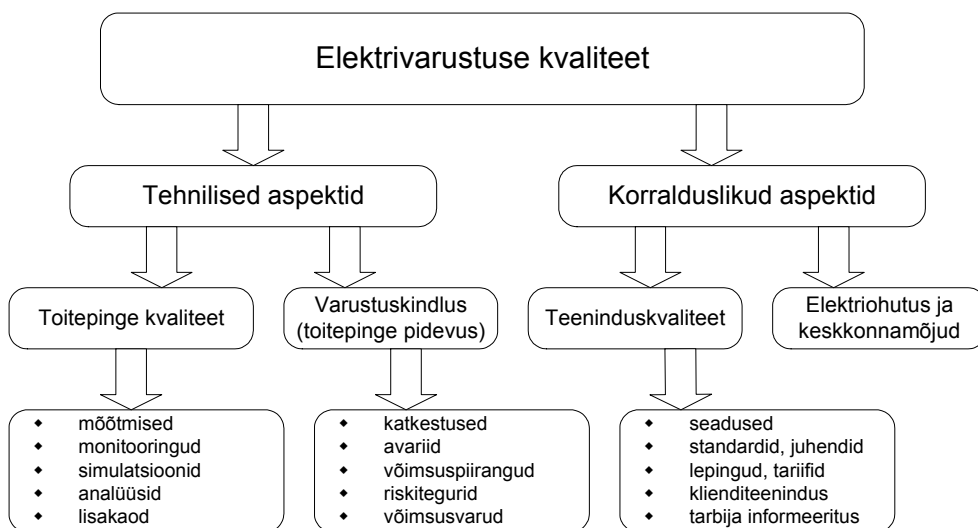
**Elektrivarustus ja toitepinge kvaliteet** hõlmab nii tehnilisi, majanduslikke kui ka organisatsioonilisi ja lepingulisi valdkondi. Tähelepanu nende valdkondade probleemidele on olnud suur pikka aega ja avaldatud on rohkesti uurimistulemusi artiklitena [5, 6, 27, 33, 60, 61, 65, 66, 84, 88, 92, 94, 95, 96] ning raamatute ja õpikutena [10, 22, 30, 37, 76, 104, 105, 106]. Osa neist küsimustest on Eestis reguleeritud Energiaseadusega, Elektrituruseadusega ning vastava standardiga [24], osa elektrienergia müüja ja ostja vaheliste lepingutega ning elektrienergia hinnakujundusega (tariifidega). Peale selle on elektrienergia müüja (võrguettevõtte) ja elektrienergia ostja (tarbija) suhetes ka küsimusi, mis on reguleerimata.

Kokkuvõtlikult hõlmab elektrivarustuse kvaliteet järgmisi põhilisi tarbijat puudutavaid valdkondi (joonis 2.1):

- elektrivarustuse töökindlus (toitepinge varustuskindlus),
- toitepinge kvaliteet,
- elektrivarustuse ohutus (käiduohutus),
- elektrivarustuse keskkonnamõjud,
- elektritarbija informeeritus,
- tarbija (ettevõtte) võimalused suurendada tarbimist/genereerimist,
- elektrienergia hind ja selle tariifid.

Elektrienergia hinnakujunduse põhimõtted ja tariifid on Eestis kinnitatud Konkurentsiameti poolt ja fikseeritud hinnakirjades. Elektrienergia ostu-müügilepingus ja selle kokkuleppeprotokollis sätestatakse kas lubatud suurim kasutusvõimsus kilovattides või peakaitse suurim lubatud sättevool amprites.

Elektrivarustuse ja toitepinge kvaliteedi osas tuuakse elektrienergia ostu-müügilepingus välja etteteatatud katkestuste lubatud summaarne kestus aastas. Seejuures katkestuste üldarv või esinemissagedus pole fikseeritud. Toitepinge kvaliteet liitumispunktis peab vastama standardile EVS-EN:50160, kuid standardi normid on väga leebed. Seejuures ei tehta vahet pinge kvaliteedil ilma tarbija koormuseta ning koos tarbijapoolse mõjutusega pinge ja voolu parameetritele.



Joonis 2.1. 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 näiteks loodusnähtused, kaevetööd või seadmete rikked. Aastas võib esineda mõnikümmend kuni mõnisada lühiajalist toitekatkestust. Tarbija seisukohast olulised parameetrid on katkestuste arv aastas ning nende kestus. Elektri varustuskindlust hinnatakse näiteks järgmiste parameetrite alusel:

- ❑ toitekatkestuste erisagedus, SAIFI (*system average interruption frequency index*),
- ❑ toitekatkestuse keskmine kestus kliendi kohta, SAIDI (*system average interruption duration index*),
- ❑ kliendi toitekatkestuse keskmine kestus, CAIDI (*customer average interruption duration index*).

Elektri varustuskindluse näitajad leitakse elektrikatkestuste statistiliste andmete alusel. Need võimaldavad võrrelda jaotusvõrke ja võrgupiirkondi ning töökindluse tõstmiseks rakendatud meetmete tõhusust. Eesmärgiks seatud SAIFI, SAIDI ja CAIDI väärtused on tavaliselt 1,0...1,5 tundi.

Elektrivarustuse ohutus ja keskkonnamõjud on iga inimest puudutavad valdkonnad, millega Eestis tegelevad Elektrikontrollikeskus ja Keskkonnainspektsioon.

Elektrivarustuse teeninduskvaliteet hõlmab eelkõige suhteid elektrienergia müüja ja ostja vahel ning samuti ostja (tarbija) informeeritust. Tarbija informeerituse osas on osalt tänu infolevile veebikeskkonnas olukord tunduvalt paranenud, kuid on ka arenguruumi. Tarbijal on näiteks vajalik teada, kuidas muutub energia hind

tulevikus, millised rekonstrueerimised ja investeeringud puudutavad tema võrgupiirkonda, missugune on toitepinge kvaliteet tema liitumispunktis jne. Kui tänase seisuga on tarbijal juba võimalik tellida tagasiulatuvalt aktiiv- ja reaktiivvõimsuse koormusgraafikud, siis toitepinge kvaliteedi osas selline võimalus puudub. Tarbijat mõjutavad kindlasti järgmised parameetrid: toitekatkestuste summaarne kestus aastas ja katkestuste arv, oluliste pingehälvete arv, kestus ja ulatus ning keskmine pingeniivo liitumispunktis. Seega oleks tarbijal kasulik saada infot ka nende parameetrite kohta. Elektriarestite ja veebikeskkonna tarkvara arenedes tekib ilmselt lähitulevikus võimalus ka jooksvalt andmeid saada nii tarbitavate võimsuste, voolude kui ka pingekvaliteedi parameetrite kohta. Vastavad mõõtearvestid (multifunktsionaalsed kaugloetavad arvestid) on juba praegu tootmises, kuid nende kasutamisel esineb probleeme tarkvara töökindluse ja kasutajasõbralikkusega.

## **2.4 Toitepinge kvaliteeti mõjutavad tegurid, kvaliteeditasemed ja uurimise eesmärgid**

Toitepinge kvaliteet on tähtis osa üldisemast ja laiemast valdkonnast – elektri-varustuse kvaliteedist, millele on suunatud nii elektrienergia jaotusvõrkude kui ka elektritarbijate kõrgendatud tähelepanu ja millel on oluline osa ka nende omavahelistes suhetes. Ühest küljest mõjutab toitepinge ja elektrivarustuse kvaliteet otseselt ettevõtete energiatarbimist, tõrgete ning häiringute ulatust elektriseadmete ja tootmisliinide töös ning ettevõtete kulutusi toodangu- või teenuseühikule. Teisest küljest on ettevõtete seadmeпарк ja tootmistehnoloogiad muutunud järjest keerukamaks ning toitepinge kvaliteedihälvete suhtes tundlikumaks. Lisaks eeltoodule on ka elektrienergia hind aja jooksul pidevalt kasvanud. Seetõttu on ka ettevõtete nõudlikkus toitepinge kvaliteedi suhtes kasvanud.

**Ideaalne toitepinge ja reaalne toitepinge.** 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 hälbed (pingelohud ja pingemuhud) ja siirdeliigpinged puuduvad;
- toitepinge (etteteatamata) katkestused puuduvad;
- toitepinge harmoonilised moonutused puuduvad või on tühiselt väikesed, pingekuju on ideaalselt siinuseline;
- pinge kolmefaasilises süsteemis on täiesti sümmeetriline.

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



Toitepinge kvaliteet ettevõtte (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, pingeniivoo 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.

Toitepinge kvaliteet mõjutab samaaegselt nii tarbijaid kui ka elektrivõrku. Mõju tarbijatele avaldub kasutusvõimsuse muutustes, võimsuskadudes ja tarbija seadmete töö häiretes. Mõju elektrivõrgule avaldub peamiselt võimsuskadudes liinides ja trafodes. Jaotusvõrkude käidutingimuste ja võimsuskadude uurimistulemusi on avaldatud töödes [72, 82, 103]. Ettevõtete elektrisüsteemide kohta on vähe uurimistulemusi. Kvaliteedinäitajad võib jaotada kolme gruppi.

- Äärmised lubatavad kvaliteedihälbed, mis on määratud tarbija elektrisüsteemi osade, elektriseadmete ja tarvitite tehniliste tingimuste ja kasutusjuhenditega.
- Normeeritud kvaliteedihälbed, mis on sätestatud vastavate standarditega, normidega ja lepingutega.
- Optimaalsed ehk majanduslikult soodsaimad kvaliteediparameetrid, mis arvestavad elektrisüsteemi investeringute, käidu, häirete ja tõrgete, võimsuskadude ja seadmete tööeaga seotud kulusid. Käesolevas töös on energiakasutuse optimaalsust arvestatud just ettevõtte elektrisüsteemi kui lõpptarbija piirides.

Toitepinge kvaliteedi parameetrite registreerimise, analüüsimise ja hindamise üheks enamlevinud eesmärgiks on määrata, kas pinge vastab standardi nõuetele ja kas pingekvaliteedi hälbed võivad põhjustada häireid ja tõrkeid ettevõtte elektriseadmete töös. Sageli soovib ettevõtte saada selgust, miks mingi seadme töös esineb tihti tõrkeid ja kas põhjuseks võib olla toitepinge ebapiisav kvaliteet.

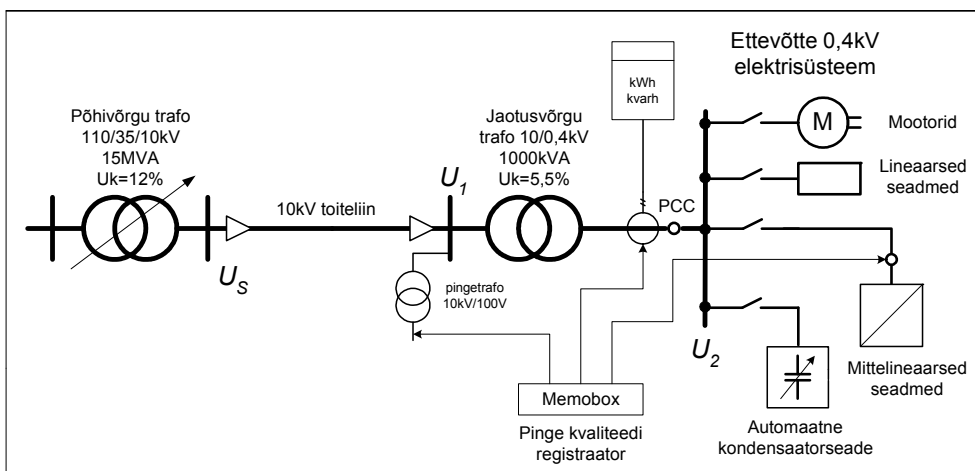
Teiseks uurimise eesmärgiks on välja selgitada, kas antud parameetritega toitepinge on sobiv (optimaalne) ettevõtte energiatarbimise ja võimsuskadude seisukohast, kas antud toitepinge tagab tõhusa ja säästliku energiakasutuse ning võimalikult madalad elektrikulud. Kas ja kuidas saab toitepinge parameetreid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

## 2.5 Mõõtepunktide valik toitepinge kvaliteedi uurimisel

Mõõtepunktiks ehk kontrollpunktiks nimetatakse punkti ettevõtte elektrisüsteemis, kuhu ühendatakse pinge kvaliteedi parameetreid registreeriv mõõteseade. Kuivõrd elektriseadme või tarviti talitlustingimused sõltuvad toitepingest, mis on rakendatud selle klemmidele, siis kõige esmaseks kontrollpunktiks peaks olema elektriseadme klemmid. Tavaliselt pole elektriseadmete suure arvu tõttu nende klemmipingete informatsiooni kogumine ja töötlemine põhjendatud ega ka võimalik. Seepärast on kontrollmõõtmisi mingi elektriseadme klemmidel mõtet teha ainult siis, kui just selle seadme töös esinevad häiringud ja tõrked. Kui ettevõtte madalpingevõrk on koormustele vastava ristlõikega, võib pingelangud 0,4 kV kaablites jätta arvestamata ja eeldada, et pinge kõikide seadmete klemmidel on võrdne pingega liitumispunktis või 0,4 kV jaotlas. Mõõtepunktiks on sobivaim ettevõtte liitumispunkt või sellele lähim punkt madalpinge poolel, näiteks:

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

Toitepinge kvaliteedi registreerimise võimalikud mõõtepunktid ettevõtte elektrisüsteemi pingekvaliteedi uurimisel on näidatud joonisel 2.3. Käesolevas töös kasutatud mõõtetulemused on reeglina saadud pinge parameetrite registreerimisel ettevõtete liitumispunktis PCC.



Joonis 2.2. Toitepinge kvaliteedi registreerimise võimalikud mõõtepunktid ettevõtte elektrisüsteemi pingekvaliteedi uurimisel

Ettevõtete elektrivarustuse toiteahelas on kasutusel järgmised lülid ja mõisted. Toitekeskuseks TK nimetatakse põhivõrgu alajaama, milles on trafo koos koormusastmelülitiga (*on-load tap-changer*) ja mille lattidele on ühendatud 6...35 kV jaotusvõrgu liinid. Jaotusvõrguks (keskpingevõrguks) nimetatakse 6...35 kV elektrivõrku, ettevõtte 0,4 kV elektrivõrku nimetatakse madalpingevõrguks. Pinge kvaliteeti saab 6...35 kV ja madalama pingega võrkudes mõjutada toitekeskuse koormuse all reguleeritava trafoga, keskpinge/madalpinge trafode pingeastme valikuga, jaotusvõrgu konfiguratsiooniga, kondensaatorpatareidega ja automaatsete kondensaatorseadmetega, sünkroonmootoritega, liiniregulaatoritega jne. Toitekeskuse pingeniivoo reguleerimisseaduse valikul lähtutakse harilikult toitekeskusest elektriliselt lähima ja kaugeima punkti pingest, [67].

## 2.6 Elektritarbimise mõõtmine ja registreerimine

Energiatarbimise põhilised parameetrid on olemas elektrimüüja kommertsarvestites. Üldjuhul on arvestite näidikult võimalik lisaks lugeda antud hetke voolude, pingete ja võimsuste, samuti võimsusteguri väärtused. Samuti on kommertsarvestite mälus andmed kuus tarbitud tipuvõimsuse  $P_{60max}$  (kasutusvõimsus) kohta. Lisaks on võimalik elektrimüüjalt tellida kuu aktiiv- ja reaktiivvõimsuse koormusgraafikud 60 min keskmiste väärtustega. Siiski pole koormusgraafikud 60 min väärtustega ettevõtte elektritarbimise täpsemaks uurimiseks alati piisavad. Samuti ei võimalda kommertsarvestid registreerida pingekvaliteedi parameetreid (välja arvatud pinge suurus ja sagedus). Kuna elektrimüüja ei ole tavaliselt huvitatud ettevõtte elektritarbimise uurimisest, siis piisavalt põhjaliku ja ülevaatliku analüüsi läbiviimine jääb enamasti ettevõtte enda peale, seejuures tuleb teha ka täiendavaid mõõtmisi.

Pistelistsiks mõõtmisteks mingi mistahes seadme toiteahelas on sobivad amper-tangidega multimeetrid ja analüsaatorid, mis enamasti võimaldavad mõõta voolu ja pinge efektiivväärtusi. Registreerivateks mõõtmisteks on olemas mitmesuguseid elektri- või võrguanalüsaatoreid (*power analyzers, network analyzers*) ning andme-registraatoreid (*data loggers*), samuti spetsiaalseid pingekvaliteedi analüsaatoreid ja pingekvaliteeti registreerivaid arvesteid. Üldjuhul peaks registreerimisvahemik olema üks nädal või vähemalt üks ööpäev. Registreerivaid mõõtmisi võiks nimetada välpmõõtmisteks, ülaltoodud juhul on mõõtmisvahemik ehk mõõtmisvälp üks nädal. Kuna ettevõtete elektritarbimine aastate vältel muutub, siis on ilmselt soovitatav suuremate muudatuste järel mõõtmisi ja analüüsi korrata. Olemasoleva kogemuse põhjal on kordusanalüüsi aeg 3...5 aastat.

Kõige täielikuma pildi ettevõtte elektritarbimisest annab lausseire ehk monitoring, st niisugune paigaldatud elektritarbimise seiresüsteem, mis võimaldab jooksvalt ja pidevalt registreerida vajalikud elektritarbimise koormusgraafikud ning toitepinge parameetrid. Lisaks energiatarbimise aeglastele protsessidele võib sellise seiresüsteemiga registreerida ka siirdeprotsesse seadmete või liinide töös.

## 2.7 Pinge kvaliteedi mõõtetulemuste analüüs

Mõõtmistele lisaks on vaja mõõtetulemusi analüüsida. Pinge kontrollmõõtmistega saame vastuse küsimusele, millise kvaliteediga on pinge ja kas pinge kvaliteet vastab standardi nõuetele. Lisaks huvitab ettevõtete, kas pinge kvaliteet on sobiv antud elektrisüsteemile ja kas see vastab pinge kõrgtaseme nõuetele. Mõõtmistulemuste analüüsiga selgitatakse, mis põhjusel pinge kvaliteet ei vasta püstitatud nõuetele või ei ole sobiv energiatarbimise seisukohast või teatud seadmete töö stabiilsuse ja tõrketuse seisukohast. Edasi saab analüüsida, milliseid meetmeid on vaja pinge kvaliteedi tõstmiseks rakendada ning milliseks kujuneb kvaliteet pärast meetmete rakendamist.

Võrreldes ettevõtte erinevate kontrollpunktide pingete jaotuskõveraid näiteks liitumispunktis ja mingi valitud seadme klemmidel, saab välja selgitada antud seadme pinged ja vajadusel kavandada ka meetmed pingeolukorra parandamiseks. Seega saab ettevõtte elektrisüsteemi kontrollpunkti(de) pinge kvaliteedi parameetrite alusel anda vastuseid järgmistele küsimustele:

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

## 2.8 Ettevõtete elektritarbimist iseloomustavad arvulised parameetrid

Selleks, et hinnata ja analüüsida elektritarbimise olukorda ja pingekvaliteeti ettevõttes, on vaja kokku koguda teatud hulk lähteandmeid. Osa lähteandmetest on ettevõttes olemas, osa tuleb täiendavalt registreerida. Registreerivate mõõtmiste ja elektritarbimise uurimise käigus on vajalikud järgmised lähteandmed:

- o ettevõtte aktiiv- ja reaktiivvõimsuse koormusgraafikud vähemalt ühe nädala vältel;
- o ettevõtte voolutarbimise koormusgraafikud kolmes faasis (vajadusel ka neutraaljuhisis) vähemalt ühe nädala vältel;
- o toitepinge kvaliteedi parameetrid (ettevõtte alajaamas 0,4 kV pooltel või liitumispunktis ning vajadusel üksikute seadmete toiteahelas) vähemalt 24 tunni, soovitatavalt ühe nädala, vältel:
  - faasipingete keskmised väärtused ja nende hajumine, miinimum- ja maksimumpinged,
  - toitepinge hälbed (pingelohud ja pingemuhud),
  - toitepinge katkestused,

toitepinge harmoonilised moonutused,  
pinge värelus ehk flikker,  
asümmeetria kolme faasi pingetes.

- andmed ettevõtte elektritarbimise kohta kuude lõikes viimaste aastate vältel (3...5 aastat), samuti andmed jaotusvõrguga liitumislepingu ning elektri ostu-müügilepingu kohta,
- elektrisüsteemi skeemid ja võimsamate seadmete parameetrid.

Ettevõtte elektritarbimise kõige olulisemad parameetrid mõõdetakse elektrimüügi ettevõtte (jaotusvõrgu) poolt kommertsarvestitega, mis keskmise suurusega ja suurtes ettevõtetes on enamasti kaugloetavad GSM-modemitega. Nendeks parameetriteks on:

- ühes kalendrikuus tarbitud aktiivenergia  $W_P$  (kWh), mis ajatariifide kasutamisel antakse kahes osas –  $W_{P1}$  (päevane) ja  $W_{P2}$  (öine);
- kasutusvõimsus  $P_{60max}$  ühes kalendrikuus, s.o suurim tarbitud 60 min keskmine aktiivvõimsus;
- ühes kalendrikuus tarbitud reaktiivenergia  $W_{Q+}$  (kvarh);
- ühes kalendrikuus genereeritud (võrku antud) reaktiivenergia  $W_{Q-}$  (kvarh).

Ülaltoodud parameetrid on võimalik esitada mitme viimase aasta kohta tabelina ja graafiliselt ning see on oluliseks lähteinfoks ettevõtte elektritarbimise kohta. Ettevõtte, selle teatud struktuuriosa või üksiku seadme elektritarbimise täpsemaks uurimiseks on vaja registreerida või registreeritud väärtustest arvutada järgmised parameetrid:

- voolud kolmes liinijuhis ning neutraaljuhisis  $I_{L1}, I_{L2}, I_{L3}, I_N$  (A);
- pinged kolmes faasis  $U_{L1}, U_{L2}, U_{L3}$  (V);
- pinge neutraaljuhisis kaitsemaandusjuhi PE või potentsiaaliühtlustuslati suhtes, pinge neutraaljuhisis üle 2 V võib põhjustada tõrkeid;
- aktiivvõimsus  $P$  (kW) faaside kaupa ja kokku, sümmeetrilise koormuse puhul ja lähtudes liinipingest  $P = \sqrt{3}UI \cos \varphi$ ;
- reaktiivvõimsus  $Q$  (kvar) faaside kaupa ja kokku, sümmeetrilise koormuse puhul ja lähtudes liinipingest  $Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi$ ;
- näivvõimsus kokku  $S$  (kVA);
- keskmine aktiivvõimsus  $P_{kesk}$  (kW);
- keskmine reaktiivvõimsus  $Q_{kesk}$  (kvar);
- reaktiivvõimsust iseloomustavad tegurid –  $\tan \varphi$  ja  $\cos \varphi$ .

## 2.9 Elektritarbimist iseloomustavad koormusgraafikud

Pistelisel mõõdetud või kuu tarbimise alusel arvatud keskmised parameetrid ei anna piisavat ettekujutust ettevõtte elektritarbimise kohta suurimate ja vähimate koormuste piirkonnas, samuti tehnoloogilistes siirdeprotsessides. Samas on elektri-varustuse optimeerimise seisukohalt oluline näha just elektritarbimise protsessi

teatud ajavahemiku vältel. Sellist infot annavad välpmõõtmised, kus registreerimisvälp ja -samm sõltuvad koormusgraafiku tsükli pikkusest ja muutumiskiirusest. Enamasti on ettevõtete koormus selge perioodilisusega. Sel juhul piisab, kui registreerimisvälp on 1 nädal ja registreerimissamm 15 min, st iga mõõtepunkt koormusgraafikul on 15 min vahemiku keskmine väärtus. Järgnevas tabelis 2.1 on toodud töö autori poolt enamkasutatud registreerimisparameetrite väärtused.

Tabel 2.1. Registreerimisparameetrite soovitatavad väärtused

Registreerimisvälp	Samm	Parameeter
1 aasta	1 h	$P, Q$
1 kuu	15...60 min	$P, Q$
1 nädal	15...30 min	$P, Q, U, I_L$
24 h	1...15 min	$P, Q, U, I_L, I_N$
1...8 h	1 s	$P, Q, U, I_L, I_N$

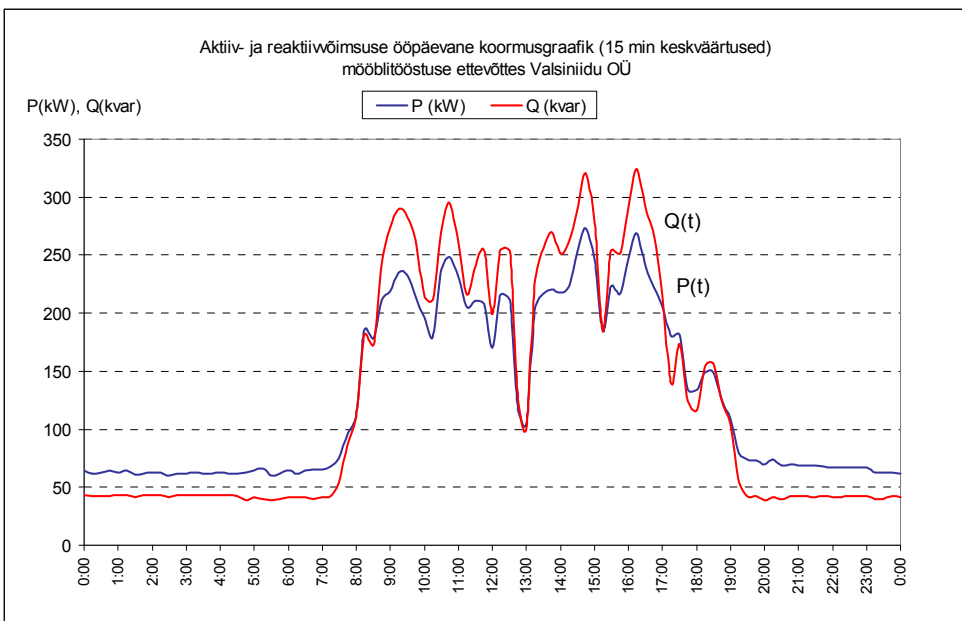
Kui koormus on tuntava temperatuurisõltuvusega, siis on lisaks oluline temperatuuride registreerimine (välisõhutemperatuur, külmkambri temperatuur vms). Kuna temperatuuri muutused on suhteliselt aeglased ja koormuste temperatuurisõltuvus suure inertsiga (suurusjärgus 1 ööpäev), siis peaks ajavahemik temperatuurimuutuste arvestamiseks olema vähemalt 1 nädal.

Kui ettevõttes on märkimisväärse võimsusega ebalineaarseid tarbijaid, siis võib olla vajalik ka erinevate vooluharmonooniliste ning harmooniliste kogumoonutuste  $THD_i$  registreerimine ajas.

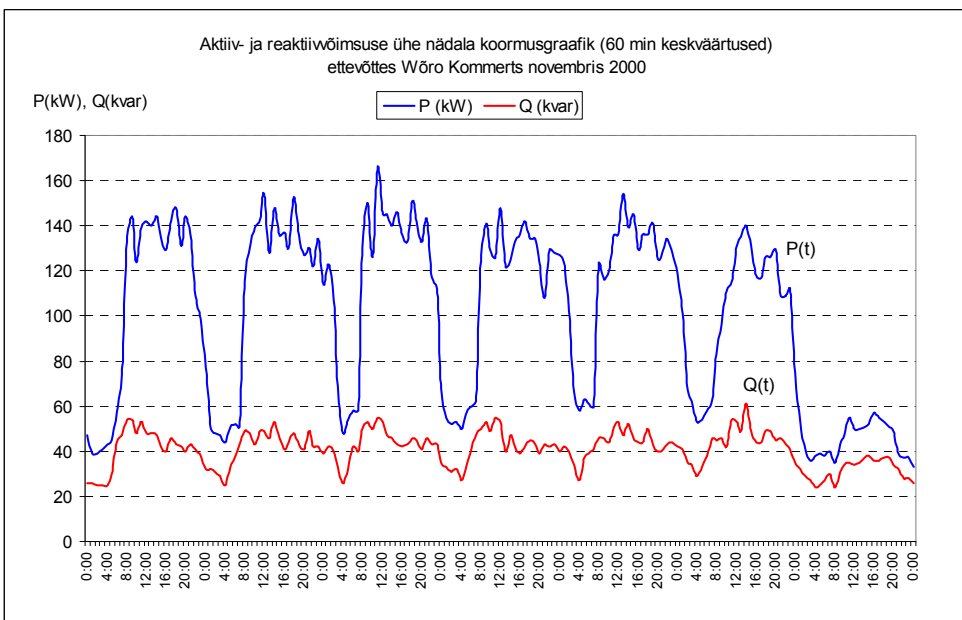
Mingi üksik seade või liin (näiteks punktkeevitusseade) võib töös olla väga lühiajaliselt, kuid suure võimsuse korral põhjustada olulisi hälbeid toitepinge kvaliteedis (näiteks kõrge värelus, pingehälbed).

Ettevõtte elektritarbimise perioodilisus võib olla ka nädalast lühem, näiteks ööpäevane. Samuti on elektritarbimine sagedasti sesoonse iseloomuga ja on väga kasulik teada aasta koormusgraafikut või vähemalt ühe talvekuu ja ühe suvekuu koormusgraafikut. Joonistel 2.3 kuni 2.7 on toodud näiteid koormusgraafikutest erinevate registreerimisvahemikega ja erinevates ettevõtetes.

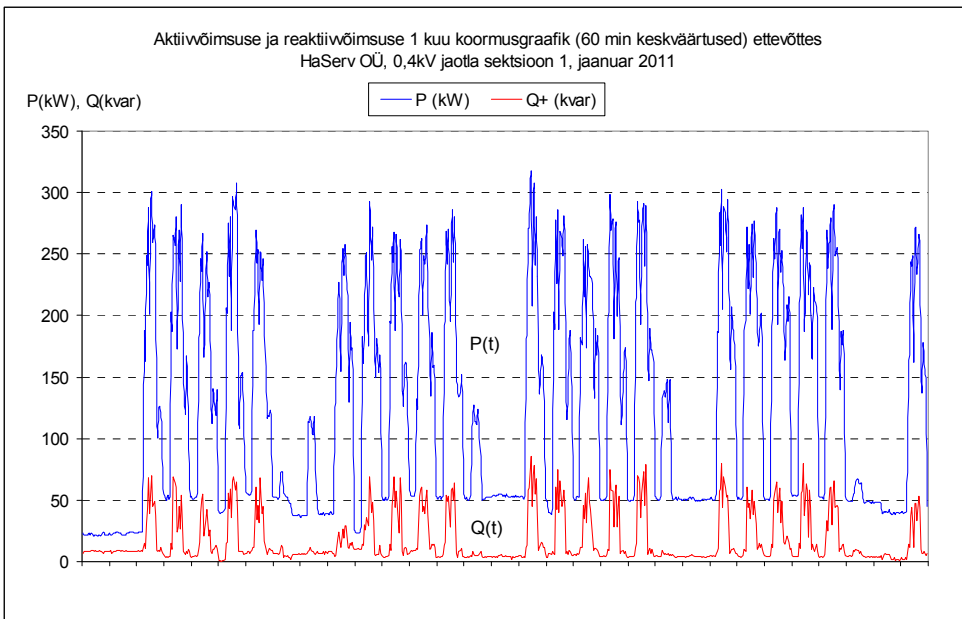
Joonistel 2.3 ja 2.4 on aktiiv- ja reaktiivvõimsuse koormusgraafikud vastavalt mööbli- ja lihatööstuse ettevõttes, kus puudub reaktiivvõimsuse kompensatsioon. Joonisel 2.5 on aktiiv- ja reaktiivvõimsuse koormusgraafikud 60 min keskmiste väärtustena puidutööstuse ettevõttes, kus on olemas toimiv reaktiivvõimsuse kompensatsioon. Joonisel 2.6 on aktiiv- ja reaktiivvõimsuse ühe aasta koormusgraafik 30 min keskmiste väärtustena elektrotehnikatööstuse ettevõttes, kus on olemas toimiv reaktiivvõimsuse kompensatsioon. Joonisel 2.7 on voolu ja pinge koormusgraafik ca 4 tunni vältel 1 s keskmiste väärtustena puidutööstuses, kus on olemas toimiv reaktiivvõimsuse kompensatsioon.



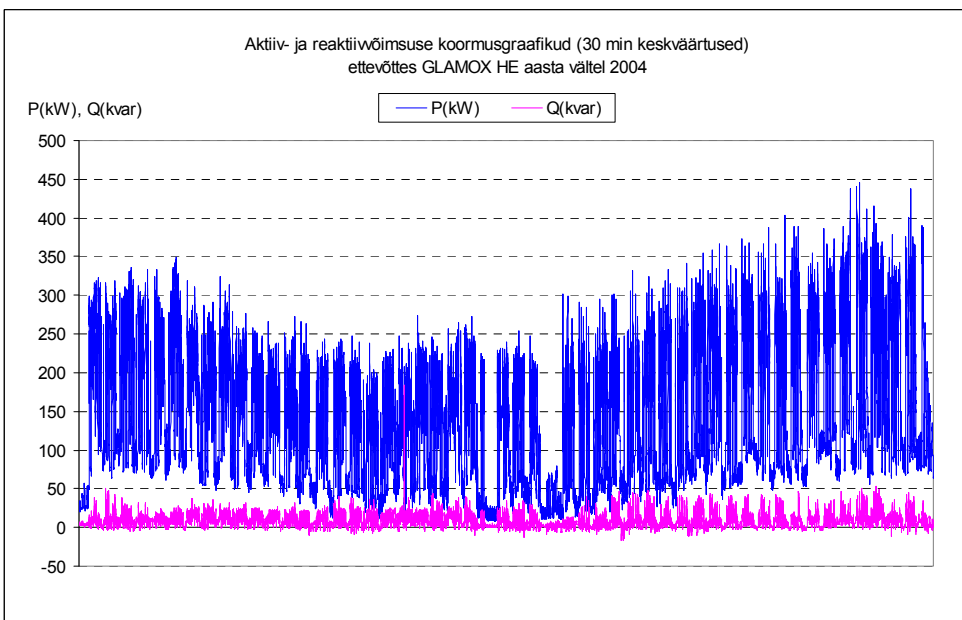
Joonis 2.3 Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse ööpäevane koormusgraafik mööblitööstuses, reaktiivvõimsuse kompensatsioon puudub, töö ajal ületab reaktiivvõimsus aktiivvõimsust



Joonis 2.4 Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse ühe nädala koormusgraafik lihatööstuses, reaktiivvõimsuse kompensatsioon puudub

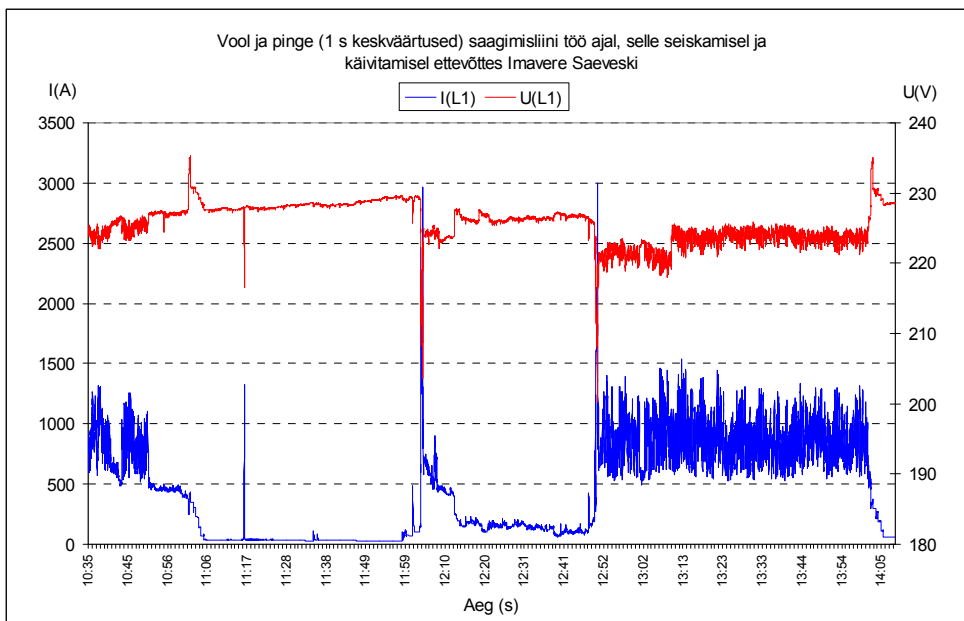


Joonis 2.5. Aktiiv- ja reaktiivõimsuse ühe kuu koormusgraafik puidutööstuses, reaktiivõimsuse kompensatsioon toimib



Joonis 2.6. Aktiiv- ja reaktiivõimsuse (30 min keskmised väärtused) koormusgraafik elektriseadmeid tootvas tööstusettevõttes ühe aasta vältel





Joonis 2.7. Voolu ja pinge koormusgraafikud (1 s keskmised väärtused) puidutööstuses, milles on näha käivitusvoolude ja vastavate pingelangude suurused ning tühijooksul tarbitav vool

Koormusgraafikud on heaks aluseks koormuste ja pinge kvaliteedi vaheliste seoste uurimisel. Koormuste modelleerimiseks jaotusvõrkudes kasutatakse erinevaid meetodeid ja mudeleid [3, 62, 63, 72, 73, 75]. Lihtsustatud mudelite puhul [110] on võetud lähtealuseks neli koormusolukorda – talvine miinimum ja maksimum ning suvine miinimum ja maksimum. Kõige lihtsamal juhul võiks lähtuda ainult kahest parameetrist – talvine maksimumkoormus ja suvine miinimumkoormus. Arvestid registreerivad 60 min suurima kasutusvõimsuse igas kuus. Kui on olemas ainult kuus tarbitud energia  $W_P$ , siis saab kasutusvõimsuse leida ligikaudse väärtusena jagades kuus tarbitud energia kuu tundide arvuga  $N_h$  ning korrutades vastavat tarbijagruppi iseloomustava koormusteguriga  $K$ , mis võib olla vahemikus 2...10:

$$P_{60max} = \frac{W_P}{N_h} K \quad (2.3)$$

Seejuures koormusgraafiku täitetegur ehk koormustegur avaldub:

$$K = W_P / P_{max} T = P_{kesk} / P_{max} \quad (2.4)$$

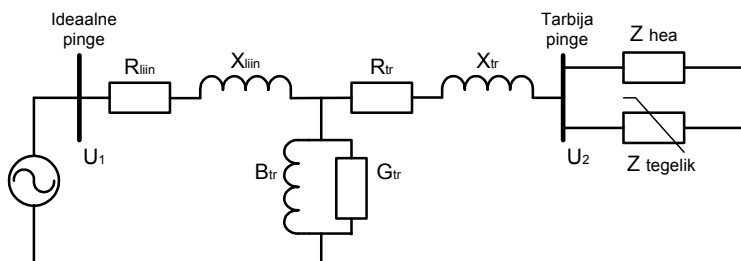
ja minimaalkoormuse tegur:

$$K_{min} = P_{min} / P_{max} \quad (2.5)$$

Siin  $W_P$  on perioodi  $T$  jooksul tarbitud aktiivenergia,  $P_{max}$ ,  $P_{min}$  ja  $P_{kesk}$  vastavalt koormusmaksimum, -miinimum ja keskmine võimsus perioodil  $T$ .

## 2.10 Tarbija ja ülekandevõrk, ideaalse ja reaalse tarbija võrdlus

Elektrienergia tootmist, ülekandmist ja jaotamist saab kõige ökonoomsemalt ja väiksemate kadudega korraldada sel juhul, kui tarbijad on ideaalsete omadustega ja jaotatud üle jaotusvõrgu vastavalt võrgu läbilaskevõimele. Ilmselt talitleks kogu energiatootmise, -ülekande ja -tarbimise 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 elektrijaamades, ja kes tarbib võimsust sellises mahus, mis on optimaalne ülekande ja jaotusvõrgule, kui kaod ülekandeliinides ja trafodes on minimaalsed. Elektrikvaliteedi muutumist ja võrgu võimsuskadusid on ülevaatliskes esitada lihtsustatud askeemina, nagu näidatud joonisel 2.8. Elektriliin on esitatud aktiiv- ja reaktiivtakistustega  $R_{liin}$  ja  $X_{liin}$ . Trafo askeemis on  $R_{tr}$  ja  $X_{tr}$  vastavalt trafo aktiivtakistus ja reaktiivtakistus, millest sõltuvad trafo koormuskadod, ning  $G_{tr}$  ja  $B_{tr}$  on aktiiv- ja reaktiivjuhtivus, millest sõltuvad trafo tühijooksukaod. Tarbija liitumispunkt võib asuda kas keskpinge või madalpinge poolel. Sellest sõltub, kas trafokaod jäävad tarbijale või jaotusvõrgule. Energiasüsteemide kogemused näitavad, et ilma pingereguleerimiseta ulatuvad pingekõikumised tarbijaklemmidel üle 10%, [106]. Seetõttu reguleeritakse pinget automaatselt põhivõrgu trafo astmelüliti abil. Põhivõrguga liitumispunktis võib lugeda lühisvõimsuse lõpmatult suureks ja pinge  $U_1$  täiesti moonutusvabaks ehk ideaalseks. Edasi mööda toiteahelat tarbija poole liikudes hakkab pinge kvaliteet järjest enam ideaalsest hälbima. Kõige suuremad on pinge  $U_2$  kvaliteedi hälbed tarbija 0,4 kV elektrisüsteemis.



Joonis 2.8. Elektrijaama, ülekandevõrgu ja tarbijat kirjeldav askeem

**Ideaalne tarbija ja reaalne tarbija.** Kuivõrd elektrijaamad toodavad elektrit kolme-faasilises süsteemis nimisagedusega 50 Hz, siis on ka ideaalne tarbija kolme-faasiline (või koosneb kolme faasi vahel ühtlaselt jaotatud ühefaasilistest tarbijatest), mille nimipinge on vastav kas generaatori nimipingele, kui see tarbija asuks vahetult generaatori läheduses või siis jaotusvõrgu vastava piirkonna nimipingele. Kuna generaatorid genereerivad siinuselist voolu, siis peaks ka tarbija vajama siinuselist voolu. Et võrku mitte koormata voolu reaktiivkomponendiga, peaks tarbitava reaktiivvõimsuse ja aktiivvõimsuse suhe olema mitte suurem kui 0,2. Ideaalne tarbija on lineaarse pingevoolutunnusjoonega – sel juhul on tarbitav voolukõver siinuskujuga ja harmoonilised moonutused voolus puuduvad. Lisaks eeltoodule

iseloomustab ideaalset tarbijat võimsuse  $P(t)$  ühtlane tase ajas. Seega on tarbija liinivoolud võrdsed ja ajas muutumatud,  $I_{L1} = I_{L2} = I_{L3} \approx \text{const}$ , ning neutraalvool  $I_N = 0$ . Jaotusvõrgu jaoks on ideaalne tarbija selline, mis tagab võrgu ja trafode talitluse minimaalsete suhteliste kadudega. Selline kadude tase on tavaliselt võimsuse puhul, mis on 40...60% trafode nimivõimsusest.

Reaalne tarbija erineb märgatavalt ideaalsest. Üha rohkem on niisuguseid tarbijaid, mille elektritarbimise parameetrid ei ole ühegi parameetri osas ideaalile lähedased. Tarbitav võimsus võib olla ajas hüplev või pulseeriv, asümmeetriline või ühefaasiline, võimsustegur võib olla väga madal ( $\cos\varphi = 0,2 \dots 0,7$ ), tarbija võib olla tugevasti ebalineaarne, kusjuures tarbitava voolukõvera harmooniliste moonutustegur võib olla vahemikus  $THD_i = 10 \dots 150\%$ . Tarbija koormus võib olla jaotusvõrgu ja trafode optimaalse koormuse suhtes liiga madal (alla 20...30%) või ka liiga kõrge (üle 70...80%). Kõik need reaalse tarbija koormusvoolu hälbed ideaalsest põhjustavad hälbeid ka toitepinge kvaliteedis ning täiendavad võimsuskadusid tarbija elektrisüsteemis, jaotusvõrgus ning teiste tarbijate elektriseadmetes.

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 ülekandevõrgus.

Elektrienergia ülekanne, jaotamine ning tarbimine toimub minimaalsete kadudega ideaalsete tarbijate puhul. Reaalsete tarbijate omaduste tõttu on nii energiatarbimine kui ka kaod sellest minimaalsest tasemest suuremad. Elektritarbimise ja toitepinge kvaliteedi uurimine annab informatsiooni selle kohta, millised on võimalused vähendada energiatarbimist ja -kadusid ning tõrkeid elektriseadmete töös, seega kokkuvõttes elektrikulud. Reaalne elektrikvaliteet on kompromiss seadmete tehniliste ning tarbija ja jaotusvõrgu majanduslike võimaluste vahel, kuna ideaalse elektrikvaliteedi tagamine osutuks mõttetult kulukaks. Eesmärgiks on piisavalt hea elektrikvaliteet nii tarbija kui ka jaotusvõrgu jaoks.

## **2.11 Mõõtetulemuste statistiline analüüs elektritarbimise ja toitepinge kvaliteedi uurimisel**

Elektritarbimise ja toitepinge kvaliteediparameetrite mõõtetulemuste analüüsil on tegemist väga suuremahulise informatsiooni töötlemisega. Tarbitava võimsuse, voolude või pingekvaliteedi ühe nädala mõõtetulemused sisaldavad suure hulga arväärtusi, mis arvude ja tabelite kujul on raskesti hinnatavad ja analüüsitavad. Nädalas on 1008 10-minutilist intervalli. Registreeritavaid toitepinge parameetreid kolmes faasis võib olla ca 90 (pingete kesk-, miinimum- ja maksimumväärtused, harmoonilised pinged ja moonutustegurid, asümmeetria ja värelus), järelikult koguneb nädalase mõõtmise tulemusena  $1008 \times 90 = 91720$  arväärtust. Saadud mõõtetulemusi on hõlpsam analüüsida, kui need statistiliste parameetritena.

Käesolevas töös on toitepinge parameetrite ja koormuste uurimisel kasutatud mitmeid tõenäosusteooria ja matemaatilise statistika üldtuntud põhimõisteid, mis kirjeldavad juhusliku suuruse ootusväärtust ja hajumist teatud tõenäosusega. Nende põhimõistete abil on kirjeldatud pingetaseme, pinge kõrvalekalde suuruse, pinge harmooniliste moonutuste, vareluse ja asümmeetria olukorda uuritud ettevõtete elektrisüsteemides ning samuti aktiiv- ja reaktiivkoormuste tõenäolist jaotust.

Ettevõtte elektrisüsteemi on ühendatud palju ajaliselt muutuva koormusega tarbijaid. Enamasti on koormuse muutused juhusliku iseloomuga. Seepärast on ka pinge parameetrid ettevõtte liitumispunktis ja elektrisüsteemi üksikutes punktides juhusliku iseloomuga, [67].

Juhusliku suuruse jaotuskõverad võivad olla väga mitmesuguse kujuga. Praktikas kõige sagedamini esinev jaotusseadus on normaaljaotus ehk Gaussi jaotusseadus ja ta on piirseaduseks, millele lähenevad teised jaotused. Selleks, et empiirilisel teel leitud jaotusseadus vastaks normaaljaotusele, on vajalik, et juhuslike sündmuste kogum oleks suur. 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  $4\sigma$  sattumise tõenäosus on 95,4%. Selle vahemiku piirid määratakse seostega

$$V_1 = \bar{V} - 2\sigma \quad \text{ja} \quad V_2 = \bar{V} + 2\sigma, \quad (2.6)$$

kus  $\bar{V}$  – parameetri matemaatiline ootus ehk keskmine väärtus;  
 $\sigma$  – parameetri standardhälve.

Normaaljaotuse tihedusfunktsiooni avaldis on

$$f(v) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(V-\bar{V})^2}{2\sigma^2}} \quad (2.7)$$

Normaaljaotuse kõveral on üks tipp ehk kõver on unimodaalne ning kõver on sümmeetriline läbi tipu ja matemaatilise ootuse mineva vertikaali suhtes.

Normaaljaotuse puhul on väga lihtne arvutada tõenäosust, millega juhuslik suurus, näiteks pinge, asub etteantud vahemikus. Vastavad arvutustulemused on toodud tabelites 3.1 ja 3.2. Pinge vahemik on toodud standardhälbena nimipingest. Tabelis 3.1 on toodud tõenäosused standardile vastava nimipingega ja standardhälbe puhul. On ilmne, et sedavõrd lai pinge vahemik, kus pinge võib muutuda piirides 195...265 V, ei rahulda tarbijat. Võrdluseks on tabelis 3.2 toodud tõenäosused viis korda väiksema standardhälbe puhul, millest saab lähtuda optimaalse pinge (pinge kõrgtaseme) valikul.

Tabel 2.1. Tõenäosus, millega pinge satub etteantud vahemikku, kui pinge keskmine väärtus  $\bar{U} = 230$  V ja standardhälve  $\sigma = 11,5$  V ehk 5% nimipingest, olukord vastab standardile EVS-EN:50160

Tõenäosus	Pinge vahemik		
0,683	$\bar{U} \pm \sigma$	218...242 V	$\pm 5\%$
0,954	$\bar{U} \pm 2\sigma$	207...253 V	$\pm 10\%$
0,997	$\bar{U} \pm 3\sigma$	195...265 V	$\pm 15\%$

Tabel 2.2. Tõenäosus, millega pinge satub etteantud vahemikku, kui pinge  $\bar{U} = 230$  V ja standardhälve  $\sigma = 2,3$  V ehk 1% nimipingest, selline olukord vastab pinge kõrgtasemele

Tõenäosus	Pinge vahemik		
0,683	$\bar{U} \pm \sigma$	228...232 V	$\pm 1\%$
0,954	$\bar{U} \pm 2\sigma$	225...235 V	$\pm 2\%$
0,997	$\bar{U} \pm 3\sigma$	223...237 V	$\pm 3\%$

Ettevõtte elektrisüsteemi pingetase on määratud suure arvu võrdväärsete koormustega, mida lülitatakse sisse ja välja või mis muutuvad üksteisest sõltumatult – seega on loodud normaaljaotuse kujunemise tingimused. Kuid neile üksteisest sõltumatutele teguritele avaldavad mõju teatud domineerivad tegurid, näiteks ettevõtte töö ja puhkeaja vaheldumine. See domineeriv tegur ületab teisi tegureid ja seepärast tekib normaalsest erinev jaotus. Domineeriv tegur sõltub elektrisüsteemi koormusest ja toitekeskuse (jaotusvõrgu) pinge reguleerimisseadusest. Kui näiteks toitekeskuses pinge reguleerimine puudub või kui ei kompenseerita koormusgraafiku kogu perioodiliselt muutuvat osa, siis tuleb pinge jaotuskõver kahemodaalne. Mida suurem on toitekeskuse pinge reguleerimise kompensatsioon ja mida täielikum on reaktiivvõimsuse kompensatsioon, seda lähedasem on pinge jaotuskõver normaaljaotusele, [67].

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

### **3 Toitepinge kvaliteet Eesti ettevõtetes, analüüsi eesmärgid ja meetodika, mõõtetulemused, olukord ja probleemid**

#### **3.1 Sissejuhatus**

Käesolevas peatükis on antud ülevaade toitepinge kvaliteedi põhilistest parameetritest ja neid reguleerivatest standarditest. Samuti on toodud toitepinge kvaliteedi parameetrite mõõtetulemused Eesti ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides, iseloomustatud erinevaid parameetreid ja näidatud erinevaid mõõtetulemuste esitamise, analüüsimise ja hindamise meetodeid. Põhjalikult on välja toodud meetodika toitepinge taseme ehk pingeniivo analüüsimiseks ja hindamiseks ning ettepanekute ja soovitude andmiseks toitepinge taseme optimeerimisel ettevõtete elektrisüsteemides. Seejuures on kasutusele võetud uus mõiste – optimaalne pingetase ehk pingeniivo, mis erineb mõnevõrra seni väljatoodud mõistest pinge kõrgtase ja erineb ka pingestandardikohasest tasemest, kuid võimaldab paremini hinnata tegeliku pingetaseme sobivust antud ettevõtte elektrisüsteemis. Peatükis on välja toodud mõõtetulemused pingehälvete ulatuse ja kestuse kohta ning seni väheuuritud pingeharmoniliste moonutuste, väreluse ja pingete asümmeeria taseme kohta elektrisüsteemides. Parameetrite iseloomustamiseks on kasutatud iseloomulikke näiteid pingekvaliteedi mõõtetulemustest Eesti erinevates ettevõtetes ja erinevates piirkondades. Mõõtmised on läbi viidud aastatel 2000...2010. Mõõtetulemusi on saadud kokku 66-s mõõtepunktis erinevates ettevõtetes, millest suure osa moodustasid tööstusettevõtted, kaubandusettevõtted, büroohooned ja väiksemad äritarbijad. Seejuures on pingekvaliteedi parameetrid arvväärtustena ja graafilisel kujul välja toodud viisil, mis võimaldab toitepinge parameetrite sobivust ülevaatlikult hinnata. Samuti võimaldab mõõtetulemuste analüüsi esitatud meetodika anda soovitusi ettevõtte elektrisüsteemi täiendamiseks ja seadistamiseks lähtudes ettevõtte energiatarbimise optimeerimise vajadusest. Näiteid toitepinge kvaliteedi parameetrite mõõtetulemustest Eesti ettevõtetes on graafiliselt esitatud töö Lisas C.

#### **3.2 Toitepinge kvaliteedi parameetrid ja pingekvaliteedi standardid**

**Toitepinge kvaliteedi parameetrid.** Vastavalt IEC klassifikatsioonile kuuluvad toitepinge kvaliteedi küsimused madalsageduslike juhtivusnähtuste alla. Toitepinge kvaliteet hõlmab erinevaid parameetreid ja kirjeldab nende hälbeid ideaalsest toitepingest. Pingekvaliteeti kolmefaasilises vahelduvvooluvõrgus iseloomustavad järgmised põhilised parameetrid [72]:

- toitepinge sagedus ehk võrgusagedus,
- toitepinge suurus ja pingetase ehk pingeniivo,
- toitepinge hälbed nimipingest (pingelohud ja pingemuhud),
- toitepinge katkestused (lühi- ja pikaajalised toitekatkestused),
- siirdeliigpinged ehk transientliigpinged,
- toitepinge harmoonilised moonutused,
- toitepinge värelus ehk flikker,
- asümmeeria 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), Venemaal standardiga GOST 13109-97 [35] ja USA-s standardiga ANSI C84.1, [2]. Samas ei reguleeri standardid kaugeltki mitte kõiki toitepinge kvaliteeti iseloomustavaid parameetreid. Näiteks on normeerimata toitepinge lühiajaliste hälvete arv, kestus ja ulatus ning samuti toitekatkestuste summaarne kestus, mis sätestatakse elektrienergia ostu–müügilepinguga.

Siinjuures võib välja tuua järgmised tähelepanekud toitepinge standardite kohta:

- mida kõrgem on pingeklass, 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 tarbijatest ning ülekandevõrgust;
- standardites fikseeritud normid on kohustuslikud ainult sel juhul, kui nad on fikseeritud elektritarbija ja võrguettevõtte vahelises lepingus.

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

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

Venemaal on standardiga GOST 13109 [35] kehtestatud enam kvaliteedinäitajaid, näiteks püsipingehälve  $\delta U_y$ , pingemuutuse ulatus  $\delta U_b$ , pingekõvera moonutustegur  $K_U$ , pinge asümmeetriategur vastujärgnevuse järgi  $K_{2U}$  ja asümmeetriategur nulljärgnevuse järgi  $K_{0U}$  ning impulsspinge  $U_{imp}$ . Lubatud pingemuutuse ulatus on rangem kui standardis EVS-EN 50160, normaaltingimustel  $\pm 5\%$  nimipingest.

USA-s on pingekvaliteedi parameetrid sätestatud USA rahvusliku standardiga [2] ANSI C84.1. (ANSI – *American National Standards Institute*), mis määratleb nõuded pinge suurusele kahes kategoorias:

- Kategoorias A on normaaltingimustel lubatav pingekõikumiste ulatus kuni  $\pm 5\%$  nimipingest (120 V) tarbija liitumispunktis (*service entrance*).
- Kategoorias B on lühiajaliselt ja ebatavalistes olukordades lubatud pingekõikumiste ulatus vahemikus  $-8,3\%$  kuni  $+5,8\%$ .

Seega on standardiga lubatud pingekõikumiste vahemik USA-s samuti kitsam kui Euroopa Liidu maades.

### 3.3 Toitepinge sagedus

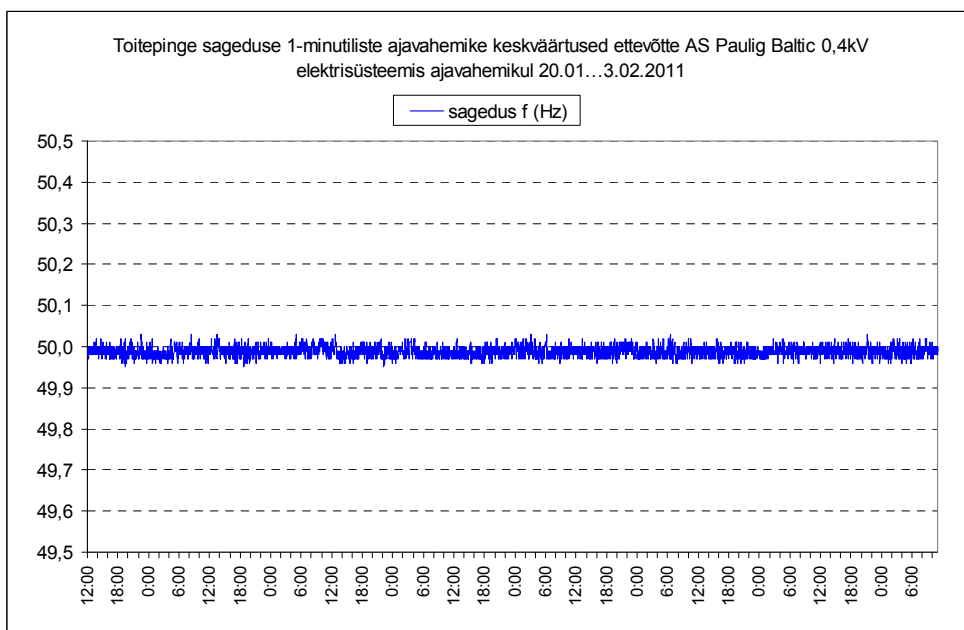
Toitepinge sagedus (*frequency of the supply voltage*) on etteantud ajavahemiku jooksul mõõdetud toitepinge põhiharmoonilise sagedus. Eestis on toitepinge nimisagedus 50 Hz. Normaaltalitlustingimustel peab põhiharmoonilise sageduse 10-sekundilise vahemiku keskmine väärtus olema:

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

Ühendelektreisüsteemiga ühendamata võrkudes, näiteks saarte lokaalsetes elektri-võrkudes, on lubatud tunduvalt suuremad sageduse hälbed. Sagedus ühendenergia-süsteemis 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:

$$\Delta f = \frac{f - f_{nimi}}{f_{nimi}} 100\% . \quad (3.1)$$

Näide toitepinge sageduse muutustest ühe nädala vältel on toodud joonisel 3.1.



Joonis 3.1. Toitepinge sagedus Eesti ühendatud elektrisüsteemis ühe nädala vältel (1-minutiliste ajavahemike keskmised väärtused)

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 energia-



süsteemis 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 ja põhiliselt vahemikus 49,95 ... 50,05 Hz ehk suhtelise hälbega  $\pm 0,1\%$  nimisagedusest 50 Hz. Seda kinnitavad arvukad mõõtetulemused aastatel 2000 ... 2010. 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 üksikud tarbijad ise sagedust kuidagi ei mõjuta ja väga väikesed sageduse hälbed ka mingit probleemi elektriseadmetele ja elektritarbimisele ei põhjusta, siis ei ole käesolevas uurimistöös sageduse mõõtetulemusi ja sageduse hälvet põhjalikumalt uuritud.

### 3.4 Toitepinge suurus, pingetase, pingetaseme analüüsi meetoodika

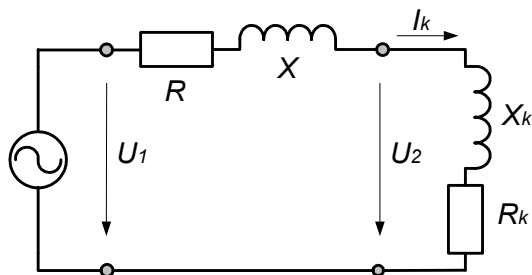
#### 3.4.1 Toitepinge suurus, nimipinge, pinge kvaliteeditasemed

Võrgu nimipinge  $U_{nimi}$  (*nominal voltage, rated voltage*) on pinge, millele võrk on ette nähtud ja millega võrreldakse talitluspinge tunnussuursusi. Aeglased pingemuutused (*voltage variations*) on toitepinge suuruse suhteliselt väikesed pinge kõrvalekalded nimipingest. Toitepinge suurus  $U$  (*supply voltage magnitude*) on pinge keskmine efektiivväärtus teatud ajavahemikul, kusjuures pinge efektiivväärtus  $U$  ( $U_{rms}$ ) on tema ruutkeskmine väärtus perioodi kohta:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \quad (3.2)$$

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

Tarbija jaoks on kõige olulisem parameeter pinge liitumispunktis PCC (*point of common coupling*). Tarbija vool  $I_k$  põhjustab toiteahelas pingelangu, mis sõltub toiteahela takistustest ning tarbitava voolu suuruselt, joonis 3.2.



Joonis 3.2. Pingelangu tekkimine toiteahelas tarbija koormusvoolu tõttu

Toiteahela takistus ajas üldjuhul ei muutu, aga tarbija vool muutub pidevalt. Seetõttu muutub pidevalt ka pingeline liitumispunktis mingis vahemikus võrgu nimipingele  $U_{nimi}$  suhtes. Seega sõltub pingeline tarbija liitumispunktis peamiselt tarbija enda koormusest ning tarbija toiteahela näivtakistusest (piltlikult öeldes kaugusest elektri jaama generaatorist). Tarbijate koormusest tingitud pingekõikumised võivad olla erineva muutumiskiiruse ja -sagedusega, näiteks on nädalased kõikumised seotud nädalase tööruutuga, ööpäevased kõikumised ööpäevase tööruutuga ja tsüklilised kõikumised seadmete tööga. Tavaliselt on hästi jälgitav ööpäevane pingeline muutumise rütm – päeval on pingeline madalam ja öösel kõrgem.

Kõige lihtsamal juhul võib faasi pingelangu toiteahelas arvutada järgmiselt:

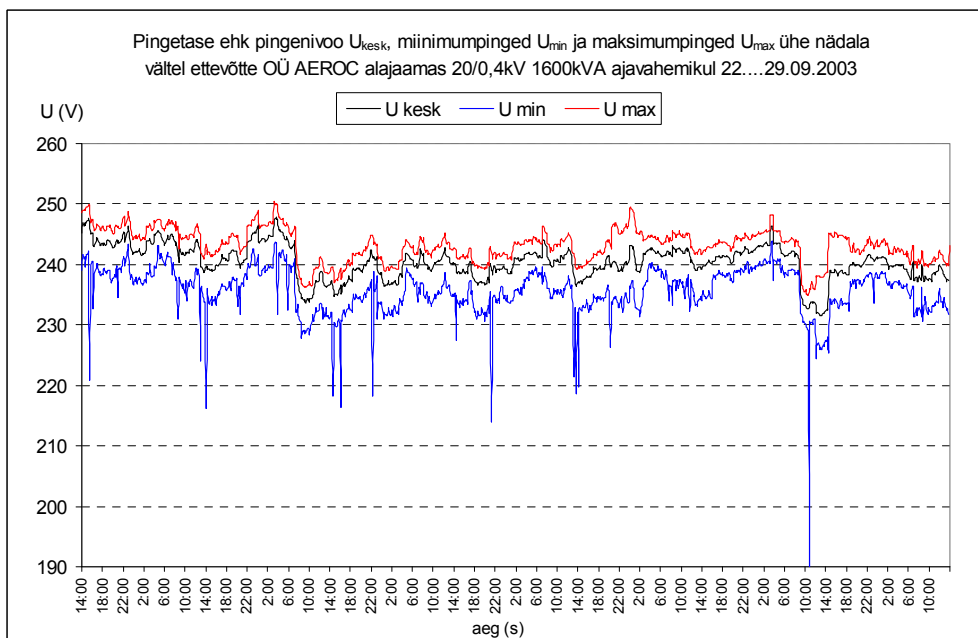
$$\underline{U}_1 - \underline{U}_2 = \underline{I}_k (R + jX) , \quad (3.3)$$

kus  $I_k$  – tarbitav vool,

$R$  – toiteahela aktiivtakistus,

$X$  – toiteahela reaktiivtakistus.

Pingeline saab iseloomustada kolme arvulise parameetriga – pingeline keskmine väärtusega ja pingeline miinimum- ning maksimumväärtustega igas 10 min vahemikus. Joonisel 3.3 on toodud kolm erinevat pingekõverat ühe nädala vältel: faaspingete keskmine efektiivväärtus 10 min ajavahemikes, pingeline poolperioodi efektiivväärtuste miinimumväärtused ja maksimumväärtused igas 10 min vahemikus. Seega on pingeline iga perioodi tegelik efektiivväärtus mingil ajahetkel alati joonisel 3.3 toodud miinimum- ja maksimumväärtuste kõverate vahel.



Joonis 3.3. Faaspingeline nivoo ehk pingetase  $U_{kesk}$ , miinimumpinged  $U_{min}$  ja maksimumpinged  $U_{max}$  ühe nädala vältel 10 min ajavahemikes ettevõtte 0,4 kV elektrisüsteemis

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

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

$$\Delta U = U_i - U_{nimi} \text{ või } \Delta U = \frac{U_i - U_n}{U_{nimi}} 100\%, \quad (3.4)$$

kus  $U_i$  – pinge efektiivväärtuste keskmine väärtus ühes mõõtevahemikus.

Standard EVS-EN 50160 sätestab nimipinge ja aeglaste pingemuutuste piirväärtused, mille kohaselt peab vähemalt 95% toitepinge efektiivväärtuse 10-minutiliste ajavahemike keskmistest väärtustest olema vahemikus  $U_{nimi} \pm 10\%$ :

$$P(U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max}). \quad (3.5)$$

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

$$P(207 \leq U_i \leq 253) \geq 0,95. \quad (3.6)$$

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

$$P(196 \leq U_i \leq 253) = 1. \quad (3.7)$$

Kui toitepinge väärtused registreeritakse 10-minutilistes vahemikes 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 pinge lubatud vahemikust väljapoole.

Pingetaseme ja pingekõikumiste statistiliseks kirjeldamiseks kasutatakse erinevaid arvulisi ja graafilisi parameetreid. Neist on väga ülevaatlik pinge tõenäosustiheduse funktsioon graafilisel kujul ehk tõenäosustiheduse jaotuskõver, mida on lihtne võrrelda standardis toodud pinge jaotuskõveraga või soovitava pinge jaotuskõveraga. Paljudel juhtudel on pinge tõenäosustiheduse funktsioon normaaljaotus või sellele lähedane. Kui pinge jaotus on normaaljaotus või sellele lähedane, siis teades pinge keskmist väärtust  $\bar{U}$  ja standardhälvet  $\sigma$  on teada kogu jaotusfunktsioon. Pinge normaaljaotuse eelduseks on olukord, kus pingekõikumisi põhjustavad mitmed väikesed pingelangud toiteahelas.

Seega tuleb vahet teha kahe sisuliselt erineva mõiste vahel – pinge sündmus (*voltage event*) ehk kiire pingemuutus ehk pingehälve ja pinge kõrvalekalle (*voltage deviation, voltage variation*) ehk aeglane pingemuutus. Pingetaseme kõrvalekallete puhul saab pinget iseloomustamiseks kasutada normaaljaotuse statistilisi parameetreid, lühiajaliste pingemuutuste ehk pingehälvete puhul normaaljaotust kasutada ei saa, nende iseloomustamisel on olulised pingehälbe kestus, hälbe suurus ehk ulatus ja hälvete vaheline aeg [10].

Pinge suuruse kvaliteeti iseloomustatakse lisaks standarditele ka pinget erinevate kvaliteeditasemetega, näiteks pinget kõrg-, normaal- ja standardtasel [72]:

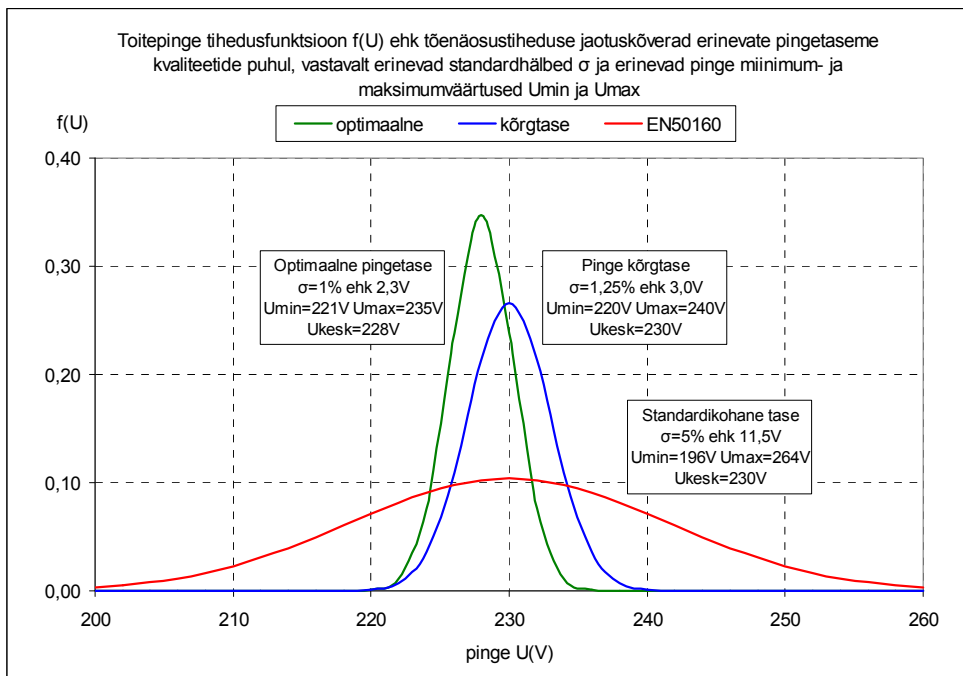
- kõrgtasel – pinget efektiivväärtuse iga 10-minutilise ajavahemiku keskmine väärtus on vahemikus 220...240 V ja 10-minutiliste ajavahemike keskmiste väärtuste keskmine väärtus on vahemikus 225...235 V;
- normaaltasel – pinget 10-minutiliste vahemike keskmine väärtus on vahemikus 207...244 V;
- standardtasel – 95% pinget 10-minutiliste ajavahemike keskmistest väärtustest on vahemikus 207...253 V ja 10-minutiliste ajavahemike keskmised väärtused on alati vahemikus 195,5...253 V.

### 3.4.2 Pingetasel ehk pingetnivoo, selle keskmine väärtus ja hajuvuse ulatus

Ettevõtte pingetaseme analüüsil tekib põhjendatud küsimus, missugune peaks antud juhul olema optimaalne ehk analüüsitava elektrisüsteemile kõige sobiv pingetasel ehk pingetnivoo, selle keskmine väärtus ja hajuvuse ulatus. Üks võimalus on lähtuda pingetkvaliteedi standardist ja hinnata pingetaset standardis toodud pinget piirväärtustest lähtuvalt. Selline lähenemine ei võimalda kahjuks anda pingetaseme kohta mingeid täpsemaid soovitusi, sest standardis on pingetaseme osas määratletud vaid nimipinget väärtus ja pinget piirväärtused. Kõik mõõdetud pinget väärtused, mis asuvad nende piirväärtuste vahel, rahuldavad standardi nõudeid, kuid ei võimalda hinnata, kas mõõdetud pingetaseme keskmine väärtus, hajuvus ja piirväärtused on sobivad antud elektrisüsteemi jaoks energiatarbimise ja võimsuskadude seisukohast. Eestis kehtiva standardi kohaselt peab pingetasel olema 100% ajast vahemikus 230 V +10% kuni -15% ehk vahemikus 196...253 V ja 95% ajast olema vahemikus 230 V ±10% ehk vahemikus 207...253 V, [24].

Tunduvalt kitsamad piirid seatakse pinget kvaliteedi kõrgtaseme puhul [10], kus pinget loetakse väga heaks ainult juhul, kui nädala keskmine pinget jääb vahemikku 225...235 V ja kõigi 10 min mõõtevahemike pinget on piirides 220...240 V. See vastab standardhälbe väärtusele  $\sigma = 3$  V ehk 1,25%. Energiatarbimise ja võimsuskadude optimeerimiseks on soovitatav lähtuda veelgi kitsamast vahemikust, kus vaatlusvahemiku (ühe nädala) keskmine pinget on 225...232 V ehk 230 V +1%, -2% ja iga 10 min mõõtevahemiku pinget piirides 221...235 V ehk 230V +2%, -4%. See vastab ligikaudu pinget keskmisele väärtusele 228 V ja standardhälbele  $\sigma = 2,3$  V ehk 1%. Niisugune asümmeetriline optimaalse vahemiku valik nimipinget 230 V suhtes tuleneb asjaolust, et nimipingest kõrgem pinget suurendab märgatavalt energiatarbimist ja võimsuskadusid, eriti mootorites ja trafodes. Nimipingest veidi

madalamatel pingetel on pinge mõju energiatarbimisele väiksem. Seejuures kasulikuks tööks muunduv energiaosa jääb pingetaseme väikese muutuse ulatuses ( $\pm 5\%$ ) praktiliselt samaks, näiteks asünkroonmootorite kiirus sõltub pingest väga vähe. Seega erinevad pinge jaotuskõverad kõrgtaseme ja optimaalse taseme puhul standardikohase taseme jaotuskõverast, nende jaotuskõverate näited on toodud joonisel 3.4.



Joonis 3.4. Toitepinge tihedusfunktsioonid  $f(U)$  ehk tõenäosustihedused erinevate pingetaseme kvaliteetide puhul, vastavad erinevad standardhälbed  $\sigma$  ja erinevad pinge piirväärtused  $U_{min}$  ja  $U_{max}$ , tegelik pinge jääb tõenäosusega 95% vahemikku  $4\sigma$

Pingetaseme analüüsimiseks ja optimeerimiseks ettevõtetes on käesolevas töös välja toodud järgmine meetodika. Kõigepealt määratletakse analüüsi eesmärgid, seejärel viiakse läbi pingetaseme registreerivad mõõtmised soovitatavalt vähemalt ühe nädala vältel. Mõõtetulemuste alusel arvutatakse pingetaseme statistilised parameetrid ja koostatakse pinge ja pingehälbe tõenäosustiheduse ja integraalse jaotuse graafilised kõverad. Seejärel võrreldakse statistilisi ja graafilisi tulemusi standardikohase ja soovitava pingetaseme parameetrite ja jaotuskõveratega. Mõõtetulemuste alusel saadud pinge tõenäosustiheduse jaotuskõver võimaldab hinnata, kas pinge vastab normaaljaotusele või erineb oluliselt. Pinge integraalse tõenäosuse kõver võimaldab määrata, kui suur osa mõõtetulemustest jääb soovitatavatest piirväärtustest kõrgemale või madalamale. Pingetaseme analüüsi alusel saab ettevõttele anda soovitusi trafo võimsuse valiku osas, trafo astmelüliti asendi sobivuses või selle korrigeerimiseks, reaktiivvõimsuse kompensatsiooni osas, toiteahela või liini vastavuse osas antud koormustele ja samuti keskpingevõrgu automaatse

pingereguleerimise osas. Samuti saab prognoosida muutusi pingetasemes koormuste suurendamisel ja reaktiivvõimsuse kompensatsiooni rakendamisel.

### 3.4.3 Toitepinge suuruse mõõtetulemuste analüüsi eesmärgid ja arvulised ning graafilised parameetrid

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. Nende eesmärkide saavutamiseks tuleb saada vastused järgmistele küsimustele:

- missugune on pingetase ja selle hajuvus (keskmine pinge, keskmine absoluuthälve, keskmine hälve nimipingest, dispersioon);
- missugused on pingetaseme miinimum- ja maksimumväärtused;
- kas toitepinge tase ja selle hajumine vastab standardile EVS EN:50160;
- kas toitepinge on sobiv energiatarbimise ja võimsuskadude seisukohast;
- kas keskpinge automaatne pingereguleerimine toitekeskuses on kooskõlas koormuste ööpäevaste muutustega;
- kas toitetrafo võimsus on sobiv antud ettevõtte koormuste puhul;
- kas trafo astmelüliti asend on sobivalt valitud või tuleb seda seadistada;
- kas faasipinged on sümmeetrilised, kas neutraaljuhi takistus on piisavalt madal ja faasikoormused sümmeetrilised;
- kas reaktiivvõimsuse kompensatsioon on piisav antud võimsuse puhul või tuleb seda täiendada ja seadistada.

Ettevõtte elektrisüsteemi pingeniivo analüüsil on sobiv kasutada erinevaid parameetreid arvulisel ja graafilisel kujul olenevalt sellest, missugused on pingeniivo uurimise eesmärgid.

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  $\Delta U$ ;
- dispersioon  $D$  ja standardhälve  $\sigma$ ;
- pinge miinimumväärtus (10 min vahemiku vähim keskmine väärtus)  $U_{min}$ ;
- pinge maksimumväärtus (10 min vahemiku suurim keskmine väärtus)  $U_{max}$ .

Pingetaseme 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;
- pinge kõrvalekalde (pingeerinevus nimipingest) tõenäosustihedus ja võrdlus optimaalse pingeerinevuse tõenäosustihedusega;
- toitepinge kõikumise ulatuse integraalne jaotuskõver ja tõenäosustihedus.

### 3.4.4 Pingetaseme mõõtetulemuste analüüsi meetodika, toitepinge erinevad jaotuskõverad

Toitepinge mõõtetulemuste alusel saadud jaotuskõverad on erineva keskmise väärtuse ja hajuvusega. Kõige tõenäolisem pinge muutumise seaduspära on – koormusmaksimumi ajal on pinge madalam ja koormusmiinimumi ajal kõrgem. Mõõtetulemuste alusel saadud jaotuskõverate puhul on võimalikud järgmised jaotuskõverate variandid, joonis 3.5:

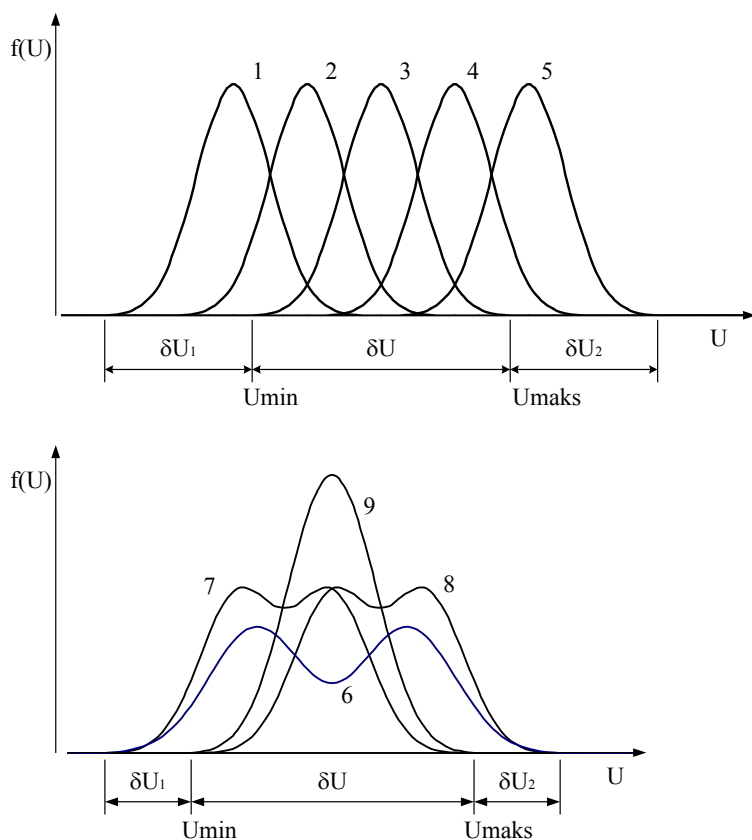
- kitsas jaotuskõver sobiva keskmise väärtusega;
- kitsas jaotuskõver nihutatud keskmise väärtusega;
- lai jaotuskõver sobiva keskmise väärtusega;
- lai jaotuskõver nihutatud keskmise väärtusega.

**Kitsas jaotuskõver.** Pinge keskmine väärtus langeb kokku nimipingega või on sellele väga lähedal (erinevus nimipingest kuni 2,5%), joonis 3.5, kõver 3. Pinge hajuvus on oluliselt väiksem (4 kuni 5 korda väiksem) kui standardiga lubatud. Mõõtetulemuste järgi arvatud standardhälve  $\sigma$  on 1...1,25% nimipingest (standardiga on lubatud kuni 5%). Pinge standardkohasesse vahemikku sattumise tõenäosus on 1,0. Pingetase vastab standardi normidele ja on väga hea.

**Kitsas nihutatud jaotuskõver.** Jaotuskõver on kitsas, kuid tema keskmine väärtus on nihutatud nimipingest suhtes ja osaliselt asub jaotuskõver väljaspool kas standardiga lubatavat või soovitatavat vahemikku (joonis 3.5, kõverad 1 ja 5). Sellesse vahemikku sattumise tõenäosus on alla 1,0. Kui sellesse vahemikku sattumise tõenäosus on alla 0,95, siis pinge ei vasta standardile. Kui pinge kõrvalekalle ületab lubatava vahemiku alumist piiri (kõver 1), siis see tähendab, et maksimaalkoormuse tingimustes on pinge liiga madal. Kui pinge kõrvalekalle ületab lubatava vahemiku ülemist piiri (kõver 5), siis on pinge minimaalkoormuse tingimustes liiga kõrge.

Arvestades, et jaotuskõver on kitsas ja pinge standardhälve  $\sigma$  ei ületa 1...1,25% nimipingest, võib eeldada, et pinge lubatavast või soovitatavast vahemikust väljamineku põhjuseks on trafo ebasobiv pingeaeg. Esimesel juhul (kõver 1) tuleb pingelisa suurendada suuruse  $\delta U_1$  võrra ja teisel juhul (kõver 5) – vähendada  $\delta U_2$  võrra. Kui see on teostatav, siis nihkub jaotuskõver pingeteljel ja läheb lubatava vahemiku sisse. Kuivõrd trafo pingelisade väärtused on diskreetsed (tavaliselt 2,5% või 5%), siis võib esineda juhtumeid, kus pinge muutmine pingelisa  $\delta U_1$  või  $\delta U_2$  võrra pole soovitatav. Siis valitakse vajalikule pingele lähim pingelisa ja jaotuskõver võtab asendi 2 või 4.

**Lai jaotuskõver.** Pinge jaotuskõvera keskmine väärtus on ligikaudu võrdne lubatava vahemiku keskmise väärtusega, pinge kõrvalekalle on aga osa ajast väljaspool lubatavat vahemikku (joonis 3.5, kõver 6). Standardhälve  $\sigma$  on üle 0,25 (veerandi) pinge lubatava vahemiku laiusest, jaotuskõver on laiem kui lubatav või soovitatav vahemik. Lubatavasse või soovitatavasse vahemikku sattumise tõenäosus on alla 0,95. Sellisel juhul trafo pingestme muutmine olukorda ei paranda. Standardile mittevastava või antud elektrisüsteemile mittesoovitatava pingetaseme põhjuste määramiseks on vaja veel täiendavat informatsiooni – aktiiv- ja reaktiivvõimsuse koormusgraafikuid ja soovitatavalt ka pingetaset keskpingel. Pinge lubatavasse vahemikku viimiseks tuleb vähendada jaotuskõvera hajuvust. Seda võib saavutada trafo võimsuse suurendamisega, keskpingevõrgu skeemi muutmisega, reaktiivvõimsuse kompensatsiooniga, neutraaliahela takistuse vähendamisega või toitekeskuse pinge reguleerimissätete muutmisega.



Joonis 3.5. Toitepinge jaotuskõverate variandid: 1...5 – kitsas jaotuskõver vastavalt trafo astmelüliti asenditele; 3 – kitsas jaotuskõver sobiva keskmise väärtusega; 6...8 – lai jaotuskõver, 9 – korrigeeritud jaotuskõver

**Lai nihutatud jaotuskõver.** Pinge jaotuskõvera keskmine väärtus on nihutatud lubatud vahemiku keskmise väärtuse suhtes (joonis 3.5, kõverad 7 ja 8). Ülaltoodud



meetmetele lisandub veel trafo pingeastme õige valik. Korrigeeritud jaotuskõver (joonis 3.5, kõver 9), kujundatakse valitud meetmete koosmõjul. Toimub jaotuskõvera nihutamine paralleelselt iseendaga trafo pingelisa võrra, kui muudetakse pingeastet, samuti toimub jaotuskõvera hajuvuse vähendamine madalamate pingete osas, kui rakendatakse reaktiivvõimsuse kompensatsiooni või suurendatakse trafo võimsust.

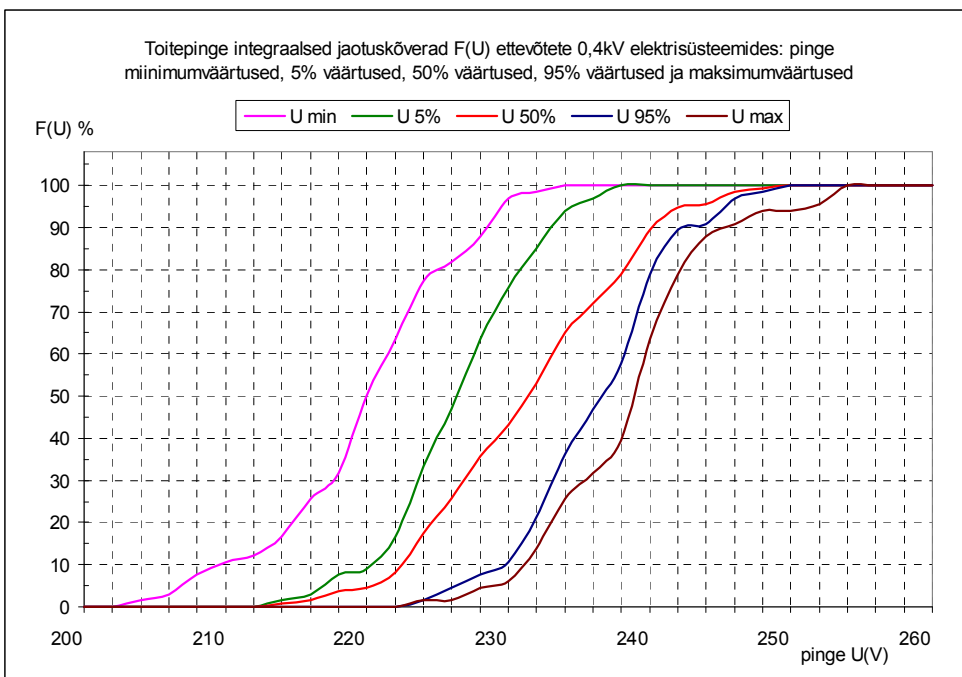
### 3.5 Toitepinge taseme ehk pingeniivo mõõtetulemused

Mõõtmiste eesmärgiks oli ettevõtete tegeliku pingetaseme ja pingehälvete väljaselgitamine elektritarbimise optimeerimiseks ning seoses kondensaatorseadmete rekonstrueerimise või paigaldamisega. Toitepinge suurus on registreeritud järgmiselt. Ettevõtte liitumispunkti 0,4 kV poolal või peakilpi on ühendatud pingekvaliteedi mõõteseadme LEM-Memobox 300, mis registreerib kolm faasipinget ühe nädala vältel 10-minutilistes ajavahemikes, samuti ka pinge miinimum- ja maksimumväärtused igas ajavahemikus. Selliste mõõtepunktide koguarv on 66, mõõtmiste aeg on kokku 66 nädalat ja mõõtmised on teostatud aastatel 2000...2010 Eesti erinevates ettevõtetes ja piirkondades. Saadud mõõtetulemused annavad küllalt suure tõenäosusega ülevaate tegelikust pingetasemest ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides. Mõõtetulemused on salvestatud andmebaasis. Statistilised koondtulemused pingetaseme parameetritest kõigi vaatlusvahemike alusel on toodud tabelis 3.1. Näiteid faasipingete registreerimise tulemustest ettevõtete elektrisüsteemides on toodud Lisas C.

Tabel 3.1. Pingetaseme ja pingetaseme hajumise parameetrid mõõtetulemuste alusel Eesti ettevõtete 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 $\sigma$ , (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

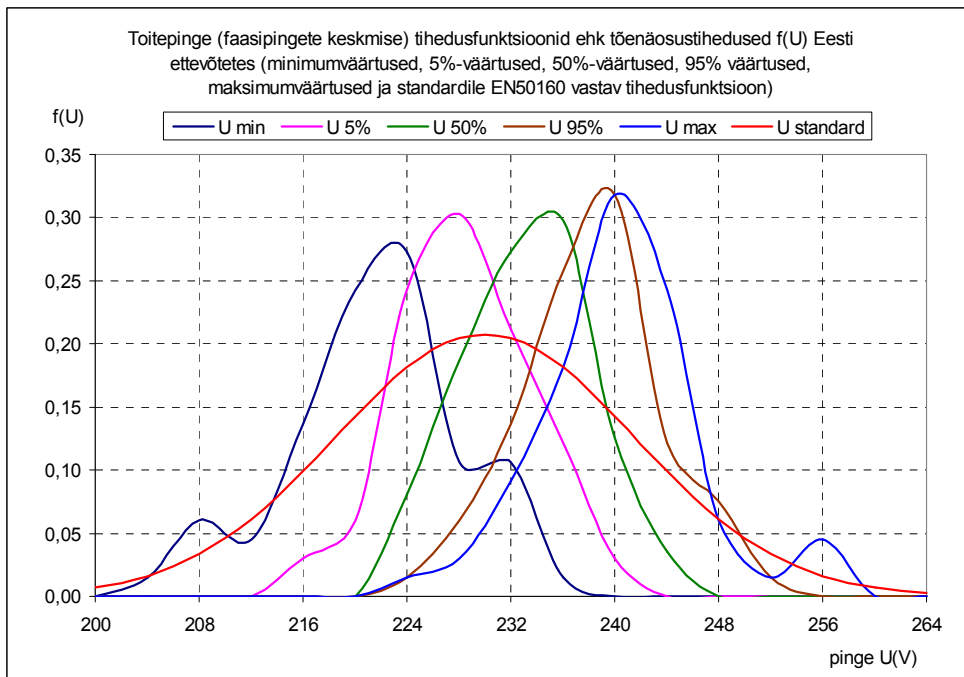
Toitepinge registreeritud taseme integraalsed jaotuskõverad ehk kumulatiivsed tõenäosused näitavad graafiliselt kujul ülevaatlikult, kui suur osa mõõtetulemustest on etteantud pingetasemega või sellest kas madalamad või kõrgemad. Jooniselt 3.6 selgub, et tõenäosusega 50% on pingetaseme miinimumväärtus 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.



Joonis 3.6. Toitepinge taseme integraalsed jaotuskõverad mõõtetulemuste alusel Eesti ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides

Toitepinge registreeritud tasemete tihedusfunktsioonid ehk tõenäosustihedused näitavad graafilisel kujul ülevaatlikult kõige suurema tõenäosusega esinevaid pingetaseme väärtusi ja pinge hajumist, samuti seda, kuidas pingeaotus normaaljaotusest erineb. Jooniselt 3.7 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 keskmete väärtuste jaotuskõver on väga lähedane normaaljaotusele.

Iseloomulikke näiteid pingetaseme parameetritest erinevate ettevõtete elektrisüsteemides on toodud tabelis 3.2. Ebasobivad või mittesoovitavad parameetrid on tabelis märgitud fooniga. Näidetes toodud parameetreid analüüsides selgub, et küllalt sageli ei ole pinge soovitatava kvaliteediga (kõrgtasemega), kusjuures põhjused on erinevad – kas erineb pingetase ehk keskmine pinge oluliselt nimipingest 230 V (enam kui 5 V võrra), on sellest madalam või kõrgem või on pingetaseme hajuvus liiga suur või on piirväärtused (maksimum- või miinimumväärtused) väljaspool soovitatavat vahemikku 220...240 V või on faasipingete asümmeetria liiga suur.



Joonis 3.7. Toitepinge taseme tihedusfunktsioonid ehk tõenäosustihedused mõõtetulemuste alusel Eesti ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides

Tabel 3.2. Pingetaseme arvulised statistilised parameetrid pingelolukorra iseloomustamiseks ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides mõõtetulemuste alusel

Parameetri nimetus	Keskmine faasi-pinge	Keskmine faasi-pinge	Keskmine faasi-pinge	Keskmine pingepinge	Keskmine absol. hälve	Dispersioon	Pinge miinimum	Pinge maksimum
Tähis	$\bar{U}_{L1}$	$\bar{U}_{L2}$	$\bar{U}_{L3}$	$\bar{U}_L$	$K$	$D$	$U_{min}$	$U_{max}$
KALDA	233,1	221,6	238,5	231,1	9,12	10,70	207,1	253,8
INVEST	241,5	241,3	237,5	240,1	5,09	6,00	223,0	252,7
AEROC	240,4	239,6	240,5	240,2	2,26	2,91	230,6	248,2
SVERIX	237,1	235,8	235,8	236,2	2,18	2,71	228,3	245,5
EERUNG	221,9	222,2	223,4	222,5	5,29	6,21	207,3	237,8
HASERV	238,5	238,0	237,4	238,0	3,59	4,09	229,0	247,9
VIRU	237,1	236,3	234,6	236,0	2,33	2,71	230,0	242,0
ESVA	224,7	224,6	223,4	224,3	1,41	1,72	219,8	229,1
PANELS	233,4	233,2	233,9	233,5	2,31	2,54	224,5	241,5
LIIMPUIT	219,6	219,2	220,5	219,8	2,13	2,70	209,3	227,3

## Järeldused pingetaseme mõõtetulemuste kohta Eesti ettevõtetes

1. Keskmise pinge integraalne jaotuskõver ja tõenäosustiheduse kõver on toodud joonistel 3.6 ja 3.7. Keskmise pinge miinimumväärtus on 220 V ja maksimumväärtus 248 V. Funktsiooni mood on 235 V ja mediaan 234 V. Pinge kõrgtasemele vastavaks (vahemikku 225 kuni 235 V) jääb 60% mõõtetulemustest, 10% mõõtetulemustest on alla 225 V ja 30% üle 235 V. Seega on keskmine pinge liiga kõrge, ületades soovitatavat pingetaset 227 kuni 230 V vähemalt 5...6 V võrra, mis vastab toitetrafode astmelüliti ühele astmele 2,5%.
2. Pingetaseme miinimumväärtuste tõenäosustihedus ja integraalne tõenäosus on toodud joonistel 3.6 ja 3.7. Miinimumpinge madalaim väärtus oli 201 V ja suurim 238 V, mood 223 V ja mediaan 224 V. Soovitatavalt peaks miinimumpinge jääma vahemikku 207 V kuni 230 V. Seega on miinimumpinge hajumine tunduvalt suurem kui soovitatav, kusjuures nii allapoole kui ka ülespoole soovitatavat vahemikku. See viitab trafode võimsuste koormustele mittevastavusele ja trafo astmelülitite ebasobivale astmele kõrgemate pingete osas.
3. Pingetaseme maksimumväärtused ja integraalne jaotuskõver on toodud joonistel 3.6 ja 3.7. Maksimumpingete madalamad väärtused 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 suurem kui soovitatav mõlemalt poolt. Põhjuseks on koormuste mittevastavus trafo võimsusele, trafode astme ebasobivus ja reaktiivkoormuse suur osakaal võimsustarbes, üksikutel juhtudel ka neutraaliahela liiga suur takistus.
4. Toitepinge jaotuse integraalkõverad ehk kumulatiivsed tõenäosused on toodud joonisel 3.6. Nendelt graafikutelt on lihtne määrata etteantud tõenäosusega esinevaid pingete miinimum-, maksimum- ja keskmisi väärtusi. Näiteks tõenäosusega 50% on pingetaseme miinimumväärtus 220 V, keskmine väärtus 232 V ja maksimumväärtus 239 V.
5. Toitepinge tase, selle keskmine väärtus ja eriti selle miinimumväärtused suuremate koormuste ajal sõltuvad oluliselt sellest, kas ettevõttes kasutatakse reaktiivvõimsuse kompensatsiooni ja kuidas see toimib – kas see on piisav ka suurte koormuste piirkonnas. Kui kompensatsioon puudub, siis on pingetaseme jaotuskõver enamasti kahemodaalne ja suurema hajuvusega, mis kajastub ka suuremas keskmises absoluuthälbes ja dispersioonis. Jaotuskõvera kõrgema pingega (ülemine) tipp vastab väikestele koormustele ja jaotuskõvera teine tipp madalama pingega (alumine tipp) vastab suurematele koormustele ettevõtte seadmete tööolukorras. Kompensatsiooni kasutamisel muutub jaotuskõver ühetipuliseks ja oluliselt kitsamaks, seega pingetaseme hajuvus väheneb ja keskmine pinge tõuseb. Neid kahte pingetaseme olukorda jaotuskõveratena reaktiivvõimsuse kompensatsiooniga ja ilma kompensatsioonita on kirjeldatud peatükis 5, kus on näidatud, et kompensatsiooni rakendamisega vähe pingetaseme hajuvus 2,5 korda, ühtlasi tõuseb pinge miinimumväärtus.

6. Pingetaseme hajuvus sõltub oluliselt trafo võimsusest. Mida võimsam on trafo antud koormuse suhtes, seda väiksem on pingetaseme hajuvus. Heaks võib pidada keskmist absoluuthälvet kuni 2,5 V – sellele vastab pingetaseme muutumise vahemik piirilukordades (tühijooks/täiskoormus) kuni 15 V, ja ebasobivaks olukorda, kus keskmine absoluuthälve on 5 V ja enam. Sel juhul on pingetaseme muutumise vahemik ca 30 V ja enam. Seega on pingetaseme hajuvust võimalik vähendada trafo võimsuse suurendamisega.
7. Registreeritud pingetasemed ja pinge suurused vastavad peaaegu kõigil juhtudel standardile EVS-EN 50160. Seega ei võimalda võrdlemine standardi lubatud vahemikuga otsustada, kas pingetase on antud elektrisüsteemile sobiv ja optimaalne või mitte.
8. Pingete suur hajumine võib olla tingitud neutraaliahela suurest takistusest. Selline olukord esines näiteks 0,4 kV õhuliinidega toitevõrgus. Sel juhul tuleb pingete tõenäosustiheduse jaotuskõverad arvutada kindlasti iga faasipinge kohta eraldi, kolme faasi keskmise pinge jaotus annab täiesti vale tulemuse.
9. Pingetaseme hindamisel standardi EVS-EN:50160 nõuete järgi on vähe mõtet, kui lähtuda ainult tingimusest  $P(0,9U_n < U_i < 1,1U_n) \geq 0,95$ . Sellist tingimust rahuldavad peaaegu kõik 10 aasta jooksul saadud mõõtetulemused. Tarbijate jaoks on palju olulisem tingimus  $P(0,9U_{nimi} < U_i < 1,1U_{nimi}) = 1$ . Selle tingimuse järgi hindamisel esines pingetaseme mittevastavust kolmel korral 66-st. Põhjuseks oli neutraaliahela liiga suur takistus.
10. Pingetaseme piisavalt väikese hajumise tagamiseks on oluline keskpingevõrgu reguleerimisseaduse ja -sätete õige valik. Tavaliselt tõstetakse pinget hommikul koormuse suurenedes ja vähendatakse õhtul, kui koormus langeb. Pingete registreerimine näiteks 1-minutilistes vahemikes võimaldab tuvastada keskpingevõrgu pingestme lülitused.
11. Pingetaseme esitus jaotuskõveratena on kasulik, kuna tegeliku jaotuskõvera võrdlemine soovitava jaotuskõveraga annab ülevaatliku pildi elektrisüsteemi pinge olukorrast. Üksikute pisteliste mõõtmistega sellist ülevaadet ei saa. Võrdluse tulemusena ning koormusest lähtudes saab otsustada, kas ja mida ette võtta. Võimalik on suurendada trafo võimsust, muuta trafo astmelüliti asendit, suurendada toiteliini, sh neutraaliahela ristlõiget, paigaldada või seadistada kondensaatorseade, taotleda jaotusvõrgu ettevõttelt keskpinge taseme täpsemat reguleerimist. Ettevõtte kui tarbija jaoks on väga oluline teadvustada seost pingetaseme ja tarbitud energia vahel ning määratleda oma elektrisüsteemile ja koormustele optimaalne pingetase.
12. Lisas 3 on toodud iseloomulikke näiteid pingete mõõtetulemustest erinevate ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides. Iga näite juures on ka lühike kommentaar antud elektrisüsteemi pingeolukorra ja selle põhjuste kohta.

### 3.6 Lühiajalised pingehälbed – pingelohud ja pingemuhud, nende põhjused ja registreerimine

Lühiajalised pingehälbed on üks oluline alaliik pingekvaliteedi parameetritest, mis mõjutavad ettevõtete tööd häiringute ja tõrgete osas väga tugevasti. Pingehälvete registreerimisele, analüüsile ja mõjule tarbija elektrisüsteemile ning -seadmetele on pühendatud rida uurimistulemusi [5, 6, 7, 17, 18, 61, 76, 91, 93, 95, 100].

Pingehälvete põhjused võivad olla nii võrgupoolsed kui ka tarbijapoolsed. Võrgupoolsete pingehälvete puhul on pinge ja voolu muutused 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 lülitamistest ja reguleerimisest (trafode lülitused, keskpinge kondensaatorite 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 usaldusväärsema pildi võrgupoolsetest pingehälvetest, mis 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 kaitselülitite 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.

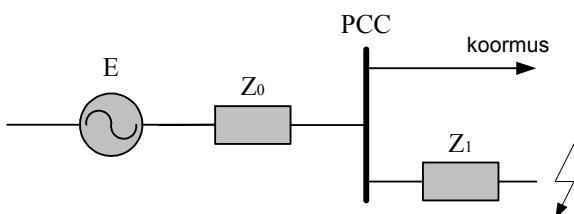
### 3.6.1 Pingelohud

Pingelohk (*voltage dip, voltage sag*) on toitepinge äkiline langus vahemikku alla 90% nimipingest ja sellele järgnev pinge taastumine lühikese ajavahemiku järel. Pingelohu kestus on tavaliselt vahemikus 10 ms kuni 1 min. Pingelohu sügavus on nimipinge ja pingelohu ajal esineva vähima pinge efektiivväärtuste vahe. Tööstusettevõtete elektrisüsteemis lubatakse erandina ka pinge vähenemist kuni – 15% nimipingest ehk nimipinge 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 normaaltalitlustingimustel ulatuda mõnekümnest tuhandeteni. Pingelohud on enamikus tingitud:

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

Lühisest tingitud pingelohu sügavus sõltub lühistakistusest, lühise asukohast elektrisüsteemis ja süsteemi konfiguratsioonist, vt joonis 3.8. Pingelohu sügavus liitumispunktis PCC arvutatakse lihtsustatud juhul (kui koormusi ei arvestata) järgmise seosega, [10]:

$$U_{\text{lohk}} = \frac{Z_1}{Z_0 + Z_1} E \text{ (\%)}. \quad (3.8)$$



Joonis 3.8. Pinge jagunemise mudel pingelohu arvutamiseks lühise puhul

Mida lähemal on lühis liitumispunktile PCC ehk mida väiksem on takistus  $Z_1$  liitumispunkti ja lühisekoha vahel, seda sügavam on pingelohk. Samuti, mida suurem on toiteahela näivtakistus  $Z_0$ , seda sügavam on pingelohk. Lühisest 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. Lühisest põhjustatud pingelohud on riskülikukujulised, pinge taastub rikke kõrvaldamise järel kiiresti. Nende pingelohkude kestus sõltub kaitseaparatuuride rakendumiskiirusest.

Asünkroonmootorite käivitusest põhjustatud pingelohud on väga sagedased ettevõtetes, kus kasutatakse võimsaid asünkroonmootoreid, näiteks saed, hõõvliid ja hakkurid puidutööstuses, suruõhu- ja külmutuskompressorid toiduainetetööstuses, veskite ajamid jne, vt joonis 3.11. Asünkroonmootorite käivitusvool on tavaliselt 5...7 kordne nimivool. Sellest voolust põhjustatud pingelohu sügavus sõltub mootori võimsusest, käivitusmeetodist, mootori ning tööseadme inertsist ja koormusest ning

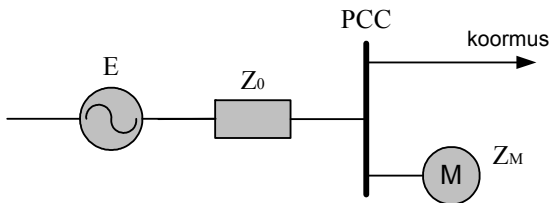
süsteemi takistusest antud punktis. Käivitamisel tekkiva pingelohu sügavus liitumispunktis arvutatakse vastavalt joonisele 3.10 seosega:

$$U_{lohk} = \frac{Z_M}{Z_0 + Z_M} E. \quad (3.9)$$

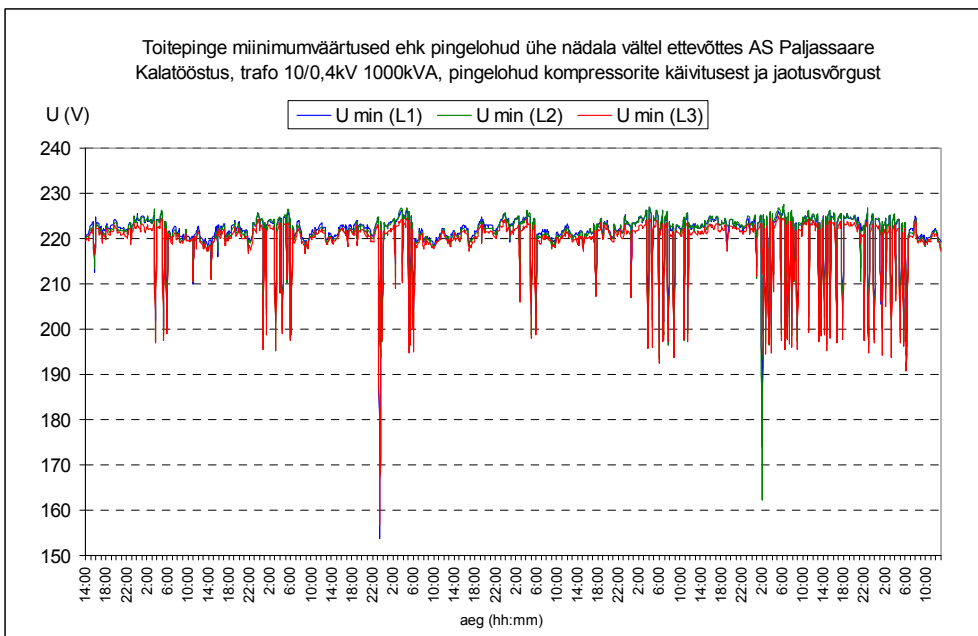
Siin  $Z_M$  on mootori näivtakistus käivituse ajal:

$$Z_M = \frac{U_{nimi}^2}{\beta \cdot S_M}, \quad (3.10)$$

kus  $\beta$  on käivitusvoolu ja nimivoolu suhe, tavaliselt  $\beta = 5 \dots 7$ .



Joonis 3.9. Pinge jagunemise mudel mootori käivitusest tingitud pingelohu arvutamiseks



Joonis 3. 10. Pingelohud toiduainetetööstuse ettevõttes ühe nädala vältel

Nende pingelohkude sügavus on tavaliselt kuni 85% lähtepingest ja kestus 0,2 kuni 20 sekundit. Mootorite põhjustatud pingelohud on sümmeetrilised, kõigis kolmes faasis langeb pinge võrdselt ja taastub seejärel sujuvalt [ 100 ].



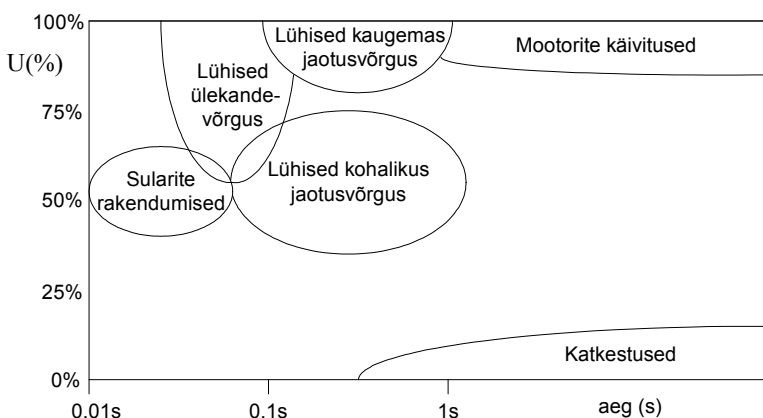
Trafode sisselülitamine tekitab samuti pingelohke. Põhjuseks on sisselülitamisel esinev magneetimisvoolu tõuge (*inrush current*). Trafo sisselülitamisel tekkiv magnetahela ajutine küllastumine põhjustab suuri magneetimisvoolusid, mis on tugevasti asümmeetrilised ja vähenevad siirdprotsessi käigus eksponentsiaalselt. Pingelohu sügavus sõltub pinge hetkväärtusest trafo sisselülitamise ajahetkel, toiteahela takistusest ja trafo jääkmagneetumusest. Seda tüüpi pingelohud esinevad trafode pingestamisel ning korduvlülitamisel pärast lühise kõrvaldamist.

Trafo sisselülitamisest tingitud pingelohud on asümmeetrilised, pingelohk on igas faasis erineva sügavusega magneetimisvoolu küllastuse erineva taseme tõttu. Pinge taastumine toimub sujuvalt. Siirdprotsessi käigus sisaldab pinge tugevasti harmoonilisi komponente, kus domineerib pingeharmoniline  $h_2$ . Nende pinge-lohkude kestus on tavaliselt 0,06 kuni 0,2 s ja sügavus kuni 80%.

### 3.6.2 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 ITIC pingetaluvuskõveraga, [38, 43] ja hõlpsamini leida pingehälvete tõenäolisi põhjustajaid. Joonisel 3.12 on toodud pingelohkude järgmised võimalikud põhjused ulatuse-kestuse diagrammil, [10]:

- 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.



Joonis 3.11. Ülevaade pingelohkude ja katkestuste põhjustest pingehälvete ulatuse-kestuse diagrammil, [10]

### 3.6.3 Pingehälvete mõõtetulemused

Pingehälvete registreerimisel mõõdetakse iga poole perioodi pinge efektiivväärtus. Kui tegelik pinge väljub etteantud pinge vahemikust, siis on tegemist pingehälbega ehk sündmusega ja pingehälbe ulatus ning ajavahemiku kestus, mil pinge oli väljaspool etteantud vahemikku, salvestatakse. 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 3.4, milles on registreeritud pingehälvete jaotus kestuse ja ulatuse järgi.

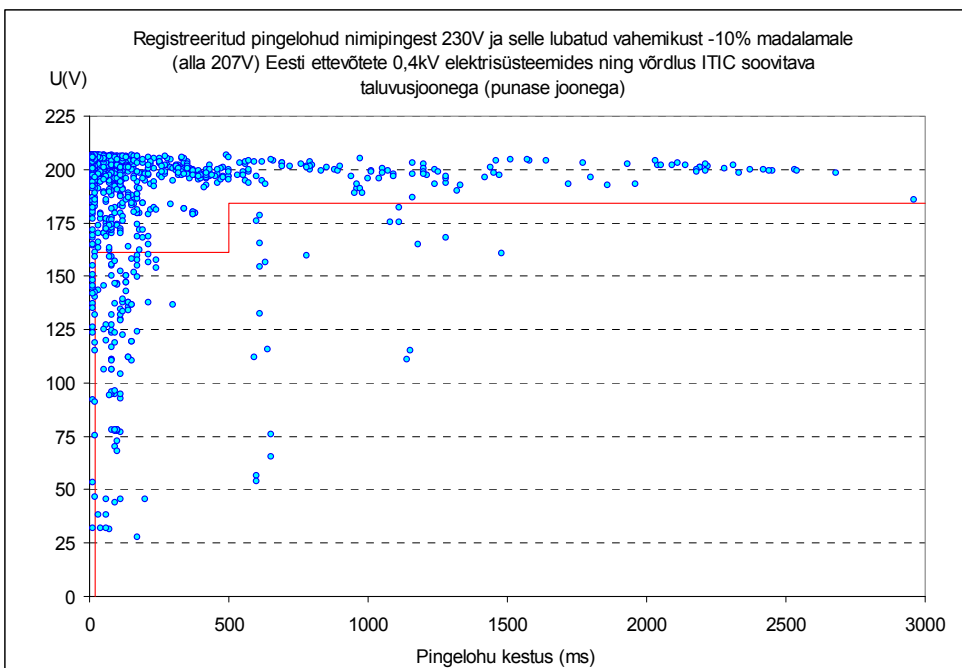
Tabel 3.4. Registreeritud pingehälvete koondtabel vastavalt IEC pingehälvete klassifikatsioonile Eesti ettevõtetes aastatel 2000...2010

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

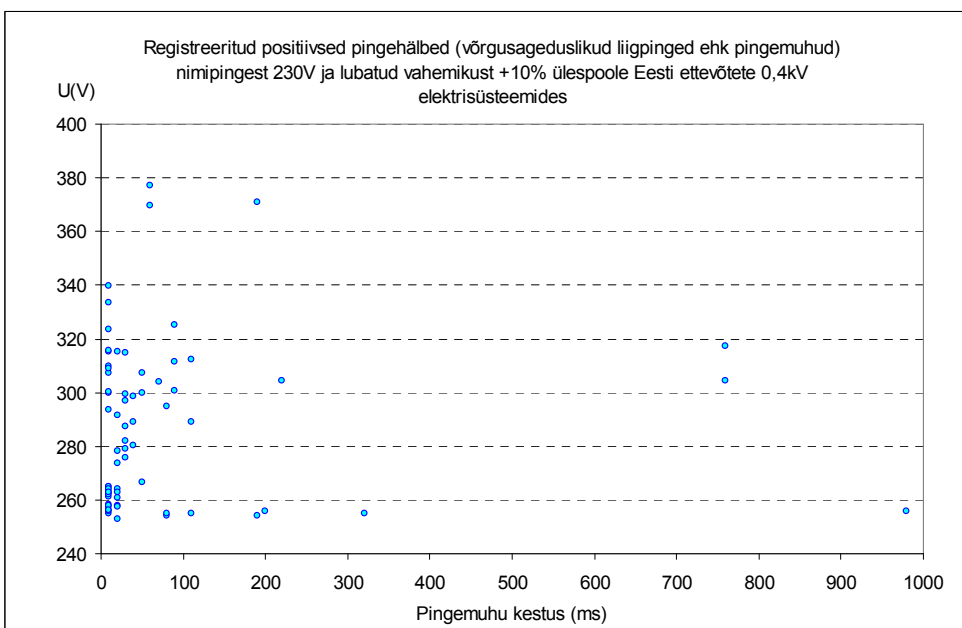
Samuti on registreeritud pingelohud esitatud graafiliselt joonisel 3.12, kus iga punkt vastab ühele pingehälbele ulatuse-kestuse graafikul. Joonisel on punase astmelise joonega näidatud pingelohkude taluvuspiir vastavalt ITIC graafikule, punasest joonest allpool olevad pingelohud võivad põhjustada probleeme.

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 suure mahtuvusliku koormuse tõttu). Liigpingetest eristatakse võrgusageduslikke pingemuhke ja tunduvalt suurema sagedusega siirdeliigpingeid (*transient overvoltages*), mida käesolevas töös ei ole uuritud.

Sageli ettetulevaks põhjuseks võrgusageduslike liigpingete tekkimises on ajutised toitekatkestused, millele järgnevad asümmeetrilised pingete siirdeprotsessid trafo sisselülitamisel, kus pinge võib mõne perioodi vältel olla lähedane liinipingele. Teise osa ajutistest liigpingetest moodustavad neutraalinihkkest põhjustatud liigpinged ühes faasides, kus pinge jääb tavaliselt vahemikku 253...265 V. Käesolevas töös on ajutiste võrgusageduslike liigpingete registreerimise tulemused toodud tabelis 3.4 ja graafiliselt pingehälbe ulatuse-kestuse graafikul joonisel 3.13.



Joonis 3.12. Pingekvaliteedi mõõtmistel registreeritud pingelohud, mis on alla 90% nimipingest 230 V Eesti ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides



Joonis 3.13. Pingekvaliteedi mõõtmistel registreeritud pingemuhud, mis on üle 110% nimipingest 230 V Eesti ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides

Siirdeliigpinge (*transient overvoltage*) on lühiajaline, järsu tõusuga kiiresti sumbuv liigpinge kestusega kuni mõni millisekund ja ulatusega kuni 6 kV. Siirdeliigpinged tekivad tavaliselt äikesest, keskpinge kondensaatorite lülitamistest või sulavkaitsmete rakendumisest. Siirdeliigpingete kahjuliku toime vähendamiseks kasutatakse liigpingepiirikuid ja elektriseadmete toiteahelates eraldustrafosid, filtreid, varistore jm.

Tarbija töö tõrketuse seisukohalt on olulise tähtsusega ka toitekatkestused ja faasikatkestused. Toitekatkestus on standardi EVS-EN:50160 kohaselt seisund, kus pinge on tarnepunktis väiksem kui 1% lepingulisest pingest. Praktikast võiks toitekatkestuseks lugeda olukorda, kus pinge on väiksem kui 30% võrgu nimipingest. Tarbija seisukohast olulised parameetrid on katkestuste arv aastas ning nende kestus. Käesolevas töös ei ole toitekatkestusi ja nende parameetreid analüüsitud, kuivõrd mõõtmiste summaarne aeg ei ole piisavalt pikk ja see ei olnud ka töö eesmärgiks.

### Järeldused pingehälvete esinemissageduse ja nende ulatuse kohta

1. Registreeritud pingehälvetest on suures ülekaalus pingelohud sügavusega  $0,85 \dots 0,9$  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 pingelohkusi. Niisugused pingelohud põhjustavad probleeme paljudes seadmetes ja tootmisliinides.
3. Samuti esines pingelohkusi 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 pingelohkusi kestusega 1...3 s ja sügavusega  $(0,7 \dots 0,85)U_{nimi}$ , 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  $(1,1 \dots 1,3)U_{nimi}$  ning teiseks lühikesed pingemuhud kestusega kuni 20 ms ja ulatusega  $(1,1 \dots 1,7)U_{nimi}$ . Probleeme ettevõtetes on tekitanud just teist liiki pingemuhud, kus seadmete toiteahelad on selle tõttu riknenud.
6. Võrgusageduslikke liigpingeid, mis on kõrgemad kui  $1,15U_{nimi}$ , esineb suhteliselt harva võrreldes pingelohkudega, mis on madalamad kui  $0,85U_{nimi}$ .
7. Ettevõtete jaoks on tavaliselt probleemiks just pingelohud ja toitekatkestused, mis näiteks mõnel juhul on sundinud paigaldama ettevõtte toitesisendisse pingekontrolli kontrolleri ja peakontaktori, mis faasipingete väljumisel etteantud vahemikust lahutab ettevõtte elektrisüsteemi teatud ajaks võrgust.

## 3.7 Harmoonilised moonutused toitepinges ja toitevoolus

### 3.7.1 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 reaalselt 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 erinevatest põhisagedusega kordse sagedusega siinuseliselt muutuvatest komponentidest. Põhikomponendi sagedus on Eestis 50 Hz ja ülejäänud komponentidel mingi põhisageduse kordne sagedus. Igal komponendil on oma amplituudväärtus ja algfaasinurk. Seega avalduvad pinge hetkväärtused tuntud kujul:

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t) + u_3(t) + \dots \quad (3.11)$$

või

$$u(t) = \sum U_{mh} \sin(h\omega_0 t + \psi_{uh}). \quad (3.12)$$

Samuti esitatakse voolu hetkväärtused kujul:

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) + \dots \quad (3.13)$$

või

$$i(t) = \sum I_{mh} \sin(h\omega_0 t + \psi_{ih}). \quad (3.14)$$

Kui laine positiivne ja negatiivne poolperiood on sama kujuga, 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 põhiharmoonilise suhtes, vastavalt  $h5$ ,  $h7$ ,  $h11$ ,  $h13$  jne. Elektriseadme voolu harmooniliste koosseis võib olla ajas püsiv (elektroonse süüturiga luminofoorlambid) või ajas muutuv nii amplituudilt kui ka sageduse spektrilt (näiteks ajamite sagedusmuundurid, keevitusseadmed).

Harmooniliste moonutuste uurimisel võib elektriseadmed jagada kahte rühma.

- Seadmed, mille vool on siinuseline ja toitepingega faasis (aktiivkoormus) või sellest ees (mahtuvuslik koormus) või taga (induktiivne koormus); niisuguste tarbijate pinge-voolutunnusjoon on kaldsirge ja neid võib nimetada lineaarseteks tarbijateks. Mida suurem on pinge tarbija klemmidel, seda suurem on ka tarbitav vool.
- Seadmed, mille voolukõver ei ole siinuseline, vaid moonutatud kujuga, nende tarvitite pinge-voolutunnusjoon ei ole lineaarne ning neid võib nimetada mittelineaarseteks tarbijateks.

Harmoonilisi moonutusi põhjustavad kõik mittelineaarsed tarvitid – sagedusmuundurid, alaldid, kaarleekahjud, keevitusseadmed, lahenduslambid, kodu- ja kontorielektronika ning infotehnika seadmed. Paarisharmoonilisi genereerivad näiteks trafod pingestamisel hüstereesi tõttu magnetimisahelas, poolperioodalaldid ja kaarleekahjud.

### 3.7.2 Pinge ja voolu harmooniliste moonutustegurid ja seosed

Kõrgemaid harmoonilisi nii pinges kui ka voolus iseloomustatakse moonutus-  
teguriga  $THD$  (*total harmonic distortion*), mis arvutatakse pinge ja voolu puhul  
vastavatest seostest:

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (U_h)^2}}{U_1}, \quad (3.15)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2}}{I_1}. \quad (3.16)$$

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

$$U = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2} = U_1 \sqrt{1 + THD_u^2}, \quad (3.17)$$

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} = I_1 \sqrt{1 + THD_i^2}. \quad (3.18)$$

Harmooniliste moonutuste ulatuse hindamiseks tarbija elektrisüsteemis on soovitatav  
teada mõlemat parameetrit. Mittelineaarset tarvitit iseloomustatakse voolu har-  
mooniliste moonutuste teguri  $THD_i$  kaudu. Voolu moonutustegur  $THD_i$  näitab,  
kuivõrd on tarbija voolu kuju moonutatud võrreldes siinuskõveraga. Voolu  
moonutustegur võib olla väga erinev vahemikus 2...150%. Kõrge voolu moonutus-  
tegur ei tähenda iseenesest kriitilist olukorda, kui selle voolu suurim keskmine  
efektiivväärtus on väike võrreldes toiteahela (võrgu) lubatud nimivooluga.

Selleks, et iseloomustada harmooniliste voolude suurust trafo nimivoolu suhtes  
kasutatakse parameetrit – voolu moonutustegur nimivoolu (liinivoolu) suhtes  $TDD_i$   
(*total demand distortion*), [9, 47]. Liinivool  $I_L$  on siin suurim tarbitav vool 15 või 30  
min vahemikus või antud liitumispunkti lubatud nimivool:

$$TDD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} (I_h)^2}}{I_L}. \quad (3.19)$$

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

Harmooniliste voolude kulgemisel on oluline trafo mähiste lülitusgrupp, kuna tähtühenduse korral sulguvad kolmandad ja sellega kordsed harmoonilised nulljärgnevuse tõttu läbi neutraaljuhi. Kui trafo üks mähistest on ühendatud kolmnurka (näiteks kolmnurk/maandatud neutraaliga täht), siis ei saa kolmandad harmoonilised trafo kolmnurka ühendatud mähises sulguda ega põhjustada pinge moonutusi jaotusvõrgus.

### 3.7.3 Nõuded pinge harmooniliste moonutuste osas

Standardi EVS EN:50160 kohaselt peab pinge harmooniliste moonutustegur  $THD_u \leq 8\%$ . Samuti on sätestatud lubatud piirväärtused üksikutele pingeharmoonilistele, vt tabel 3.5.

Tabel 3.5. Kõrgemate harmooniliste pingete (kuni 25-ndat järku) lubatavad väärtused 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					

Teiste riikide standardites on pingeharmooniliste osas määratletud ka rangemaid nõudeid. Näiteks standardis IEEE 519 lubatakse madalpinge ja keskpinge süsteemides kuni 69 kV pinge harmooniliste kogumoonutuste  $THD_u$  väärtuseks kuni 5% ja üksikute harmooniliste pingete väärtuseks kuni 3%. Paljudes uurimustes on jõutud seisukohale, et pinge harmooniliste kogumoonutuste tase üle 5% ei ole soovitatav, kuna põhjustab elektrisüsteemis lisakadusid ja võimalikke häiringuid, ning pinge harmooniliste kogumoonutuste tase üle 8...10% ei ole lubatav, [30].

### 3.7.4 Pinge harmooniliste moonutuste mõõtetulemused

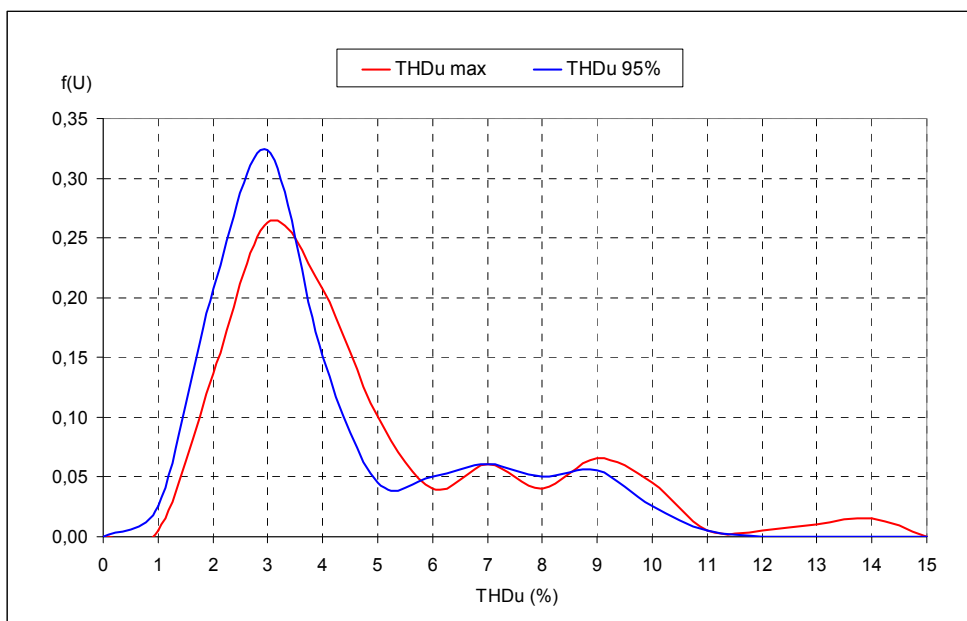
Käesoleva töö käigus on toitepinge harmoonilised moonutused registreeritud pingekvaliteedi mõõteseadmega LEM-Memobox 300 või 800 ning registreeritud on pinge harmoonilised kogumoonutused  $THD_u$  ja üksikud harmoonilised komponendid  $U_h$  kuni järguni  $h=25$  kolmes faasis ühe nädala vältel 10-minutiliste (mõnel juhul ka 1-minutiliste) ajavahemike keskmiste väärtustena. Mõõtmiste aeg kokku on 66 nädalat ja mõõtmised on teostatud aastatel 2000 kuni 2010 Eesti erinevates ettevõtetes ja

piirkondades. Mõõtmiste eesmärgiks oli ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemide pingeharmoniliste moonutuste ja resonantsinähtuste uurimine seoses kondensaatorseadmete rekonstrueerimise, seadistamise või paigaldamisega.

Mõõtetulemused on salvestatud andmebaasis. Toitepinge harmooniliste moonutuste statistilised mõõtetulemused on toodud tabelis 3.8 ja graafiliselt jaotuskõveratena joonistel 3.14 ja 3.15. Joonisel 3.16 on toodud iseloomulik näide tööstusettevõtte toitepinge harmooniliste spektrist, kus domineerivad pingeharmonilised on  $h5$ ,  $h7$ ,  $h11$ ,  $h3$  ja  $h13$  järgu pingeharmonilised. Näiteid pingeharmonilistest moonutustest ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides on toodud Lisas C.

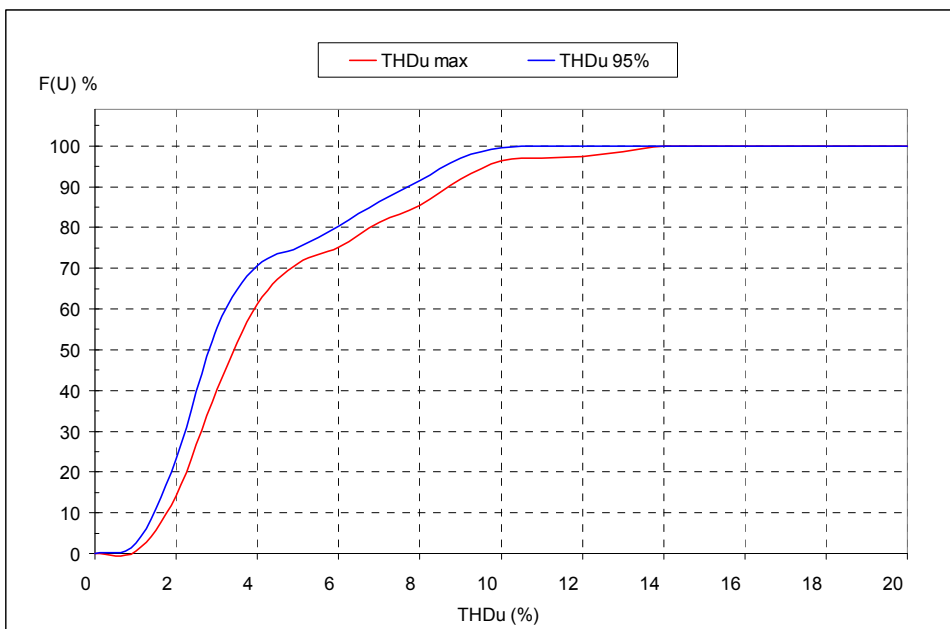
Tabel 3.8. Toitepinge harmooniliste kogumoonutuste  $THD_u$  statistilised mõõtetulemused

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

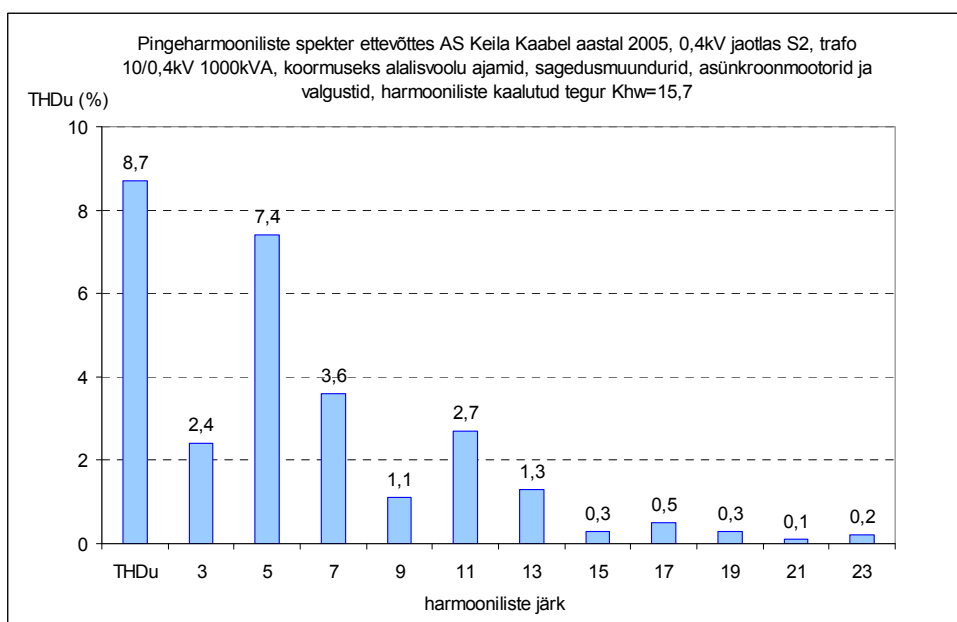


Joonis 3.14. Toitepinge  $THD_u$  registreeritud tihedusfunktsioonid ehk tõenäosustihedused Eesti ettevõtetes (95% väärtused, maksimumväärtused)





Joonis 3.15. Toitepinge  $THD_u$  registreeritud integraalse tõenäosuse jaotuskõverad Eesti ettevõttes (maksimumväärtused ja 95% väärtused)



Joonis 3.16. Toitepinge harmooniliste spektri iseloomulik näide tööstusettevõttes

## 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 ettevõtete seadmed on vähekoormatud või välja lülitatud. Võib eeldada, et ligikaudu selline on ka  $THD_u$  tase keskpinge jaotusvõrgus. Samas esineb elektrisüsteeme, kus  $THD_u$  miinimumväärtus on 4,48%, mis viitab selgelt 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 elektrisüsteemidest on niisuguse harmooniliste tasemega toitepinges, mille puhul võib esineda probleeme. Selline olukord nõuab tähelepanu, eriti juhul kui soovitakse kas koormust suurendada, paigaldada täiendavaid muundureid või kondensaatorseadmeid.
3. Pinge harmooniliste moonutuste  $THD_u$  taseme integraalselt tõenäosuse jaotuskõveralt selgub, et lubatud  $THD_u$  taseme 8% ületavad maksimumväärtusena 15% mõõtetulemustest ning 95% väärtusena 9% mõõtetulemustest. Seega ligikaudu 10...15 protsendil elektrisüsteemidest on ületatud ka standardis sätestatud harmooniliste moonutuste piirväärtus 8%. Sellistes olukordades on vaja analüüsida ja otsustada, mida ette võtta, et harmooniliste moonutuste taset vähendada. Selleks saab kasutada erinevaid lahendusi, näiteks toiteahela näivtakistuse vähendamine ja trafo võimsuse suurendamine, kondensaatorseadme varustamine filterreaktoritega, täiendavate passiivfiltrite kasutamine, uute võrgusõbralike muundurite ja alaldite kasutamine, mille volukõver on vähem moonutatud ja võimsustegur kõrge.
4. Pinge harmooniliste moonutuste tõenäosustiheduse jaotuskõveratelt selgub ka, 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.
5. Pinge harmooniliste moonutuste spektrites on tavaliselt domineeriv 5-s pinge-harmooniline, mis sageli annabki suurima osa kogumoonutustest  $THD_u$ . Arvestatavalt esineb veel järgmist järku harmoonilisi:  $h7$ ,  $h11$ ,  $h3$ ,  $h13$ ,  $h17$ ,  $h19$  ja  $h23$ . 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 sageli lihtsalt tajutav ja jääb teadvustamata seni, kuni tekivad tõrked seadmete töös. Samuti on pinge harmoonilised moonutused seotud kondensaatorseadmete kasutamisega reaktiivvõimsuse kompensatsiooniks. Kondensaatorseade mõjutab oluliselt nii harmooniliste moonutuste ulatust kui ka spektrit.

### 3.8 Toitepinge muutustega seotud valguse värelus ehk flikker

Valguse värelus ehk flikker on energiavoo häiring, mida põhjustab valgustite toitepinge pidev muutumine, kus pingemuutused edastatavas lainekujus 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 mootorid sagedasel käivitamisel (näiteks võimsate kompressorite käivitamine, eriti perioodilisel toimumisel);
- elektrooniliselt juhitud soojendus- ja kütteseadmed, kuivatuskambrid, jootmisliinid, kus juhtimine toimub SSR-tüüpi (SSR – *solid state relay*) türistorvõtmetega ja häiriva sagedusega;
- keevitusseadmed, impulsskeevitusseadmed ja eriti punktkeevitusseadmed;
- kaarleeksulatusahjud valutsehides ja metallide taassulatamisel.

Väreluse intensiivsust (*flicker severity*) arvutatakse kui pingekõikumise suhet keskmise pinge efektiivväärtusesse. Standardi EVS-EN:50160 kohaselt ei tohi normaaltingimustel pingemuutuste tagajärjel tekkiva valgusallikate väreluse intensiivsus ületada väärtust  $P_{lt} = 1$  tõenäosusega 95% nädalasest mõõteperioodist. Kuna väreluse tajumine on seotud inimesega ja seega subjektiivne, on selle taset raske objektiivselt mõõta. Rahvusvahelise elektrotehnikakomitee IEC poolt on välja töötatud mõõtmismeetod, mis modelleerib kogu ahelat *pingemuutus – valgusallikas – silm – inimaju* ning võimaldab väreluse intensiivsuse määrata flikkermeetriga. Flikkermeeter on mõõteriist, mis mõõdab flikkeri nivood inimsilma tundlikkuse parameetritega. Väreluse ehk flikkeri mõõtmiseks on koostatud rahvusvaheline standard IEC 868. Väreluse intensiivsuse määramise probleemidega seotud uurimistulemusi on toodud [6, 74, 84, 85, 95].

Väreluse intensiivsust mõõdetakse flikkermeetriga või pingekvaliteedi analüsaatoriga tavaliselt kahes ajavahemikus:

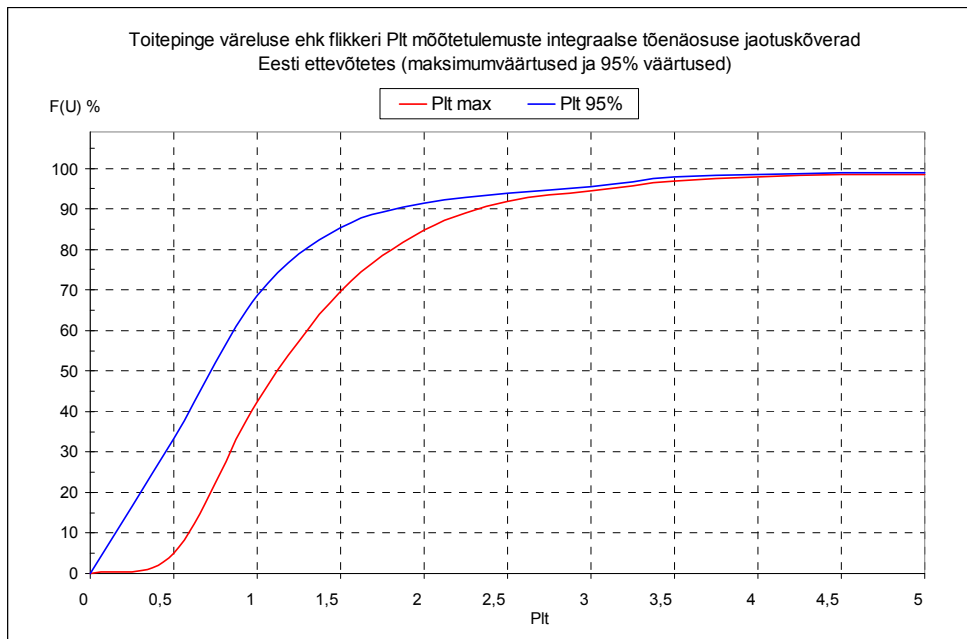
- lühikese ajavahemiku värelus  $P_{st}$  (*short term flicker severity*), mida mõõdetakse 10 min ajavahemikes, katseliselt tunnetab inimene värelust alates väärtusest  $P_{st} = 1$ ;
- pika ajavahemiku värelus  $P_{lt}$  (*long term flicker severity*), mis on 2 tunni väreluse intensiivsus ja on arvutatud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

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} (P_{st}^3 / 12)} . \quad (3.22)$$

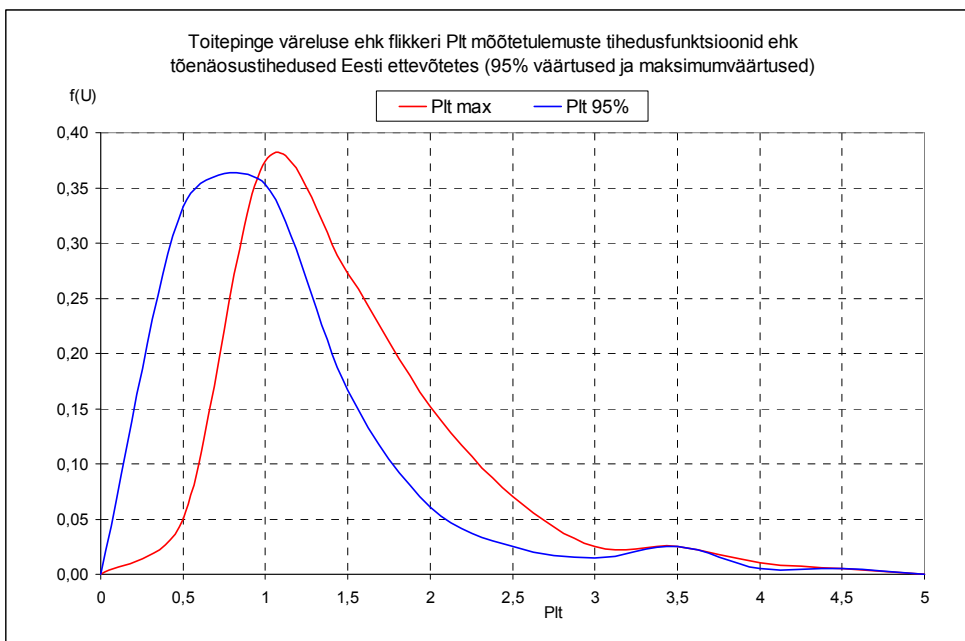
Toitepinge vareluse arvulised statistilised mõõtetulemused on toodud tabelis 3.9, integraalsed jaotuskõverad joonisel 3.17 ja tõenäosustiheduse jaotuskõverad joonisel 3.18. Näiteid vareluse taseme muutustest ajas 0,4 kV elektrisüsteemides on toodud Lisas C. Mõõtetulemused näitavad, et vareluse keskmine tase 0,4 kV elektrisüsteemides rahuldab standardi nõudeid, kuid üksikutel juhtudel on pika ajavahe miku vareluse  $P_{lt}$  tase tunduvalt (kuni 10 korda) kõrgem standardiga lubatud väärtusest ja ka otseselt visuaalselt tajutav ning häiriv. Sellised näited varelusest pinges on registreeritud metallitöötlemistsehhis, kus kasutatakse punktkeevitusseadmeid ja puidutööstuse saeveskites, kus perioodiliselt muutub võimsate mootorite koormus. Erinevus nende vahel on selles, et keevitusseadmete puhul esines vareluse kõrge tase kahes faasis, puidutööstuses kõigis kolmes faasis.

Tabel 3.9. Toitepinge vareluse 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 3.17. Toitepinge vareluse ehk flickeri  $P_{lt}$  registreeritud integraalse tõenäosuse jaotuskõverad Eesti ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides



Joonis 3.18. Toitepinge vareluse ehk flikkeri  $P_{fl}$  registreeritud tihedusfunktsioonid ehk tõenäosustihedused jaotuskõverad Eesti ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides

### Järeldused vareluse mõõtetulemuste kohta

1. Vareluse maksimumväärtus on kuni 1,0 42% mõõtevahemikest ja 95% väärtused jäävad lubatud piiridesse 69% mõõtevahemikest. Seega ligikaudu 31% uuritud ettevõtetes ületas vareluse tase lubatud piirväärtust.
2. Vareluse 95% väärtuse keskmine tase oli 1,0 ja maksimumväärtuse keskmine tase 1,4. Seega rahuldavad vareluse keskmised tasemed standardi nõudeid 95% ajast, kuid on soovitav, et vareluse tase oleks standardi nõuetele vastav 100% ajast. Tõenäosustiheduse jaotuskõverate maksimumväärtus ehk mood oli vastavalt 0,8 ja 1,1. Seega on varelus kõige sagedamini lubatud piirväärtuse 1,0 lähedal. Vareluse miinimumtase oli ca 0,2, mis on vareluse tase rahuliku koormuse või miinimumkoormuse olukorras.
3. Vareluse taseme kõige suuremad väärtused, kus  $P_{fl}=10\dots11$ , on registreeritud metallitöötlemistehhis punktkeevitusseadme töö ajal kahe faasi pinges. Keevitus toimus impulsside seeriana kestusega ca 2...10 s, kus vooluimpulsi amplituudväärtused 0,4 kV toiteliinis olid kuni 1000 A. Kuigi antud keevitusseade oli iseseisva 10/0,4 kV toitetrafoga, põhjustas seadme töö varelust kogu ümbruskonna 10 kV jaotusvõrgus.
4. Varelus on ettevõtete jaoks probleem, kui selle mõju on töötajatele häiriv. Otseselt lisavõimsuskadusid varelus ei põhjusta. Peamiseks lahenduseks vareluse vähendamisel on trafo võimsuse suurendamine, toiteliini takistuse vähendamine või varelust põhjustava seadme toitmine iseseisvast trafost.

### 3.9 Toitepinge asümmeetria ja mõõtetulemused

Kui ideaalsel juhul on pinge kolmefaasilises süsteemis sümmeetriline (faasipingete efektiivväärtused on võrdsed ning samuti on võrdsed faaside pingevektorite nihkenurgad), siis reaalsetl on pinge alati vähem või rohkem asümmeetriline. See on põhjustatud koormuste erinevusest kolmes faasis või ülekande ja jaotusvõrgu asümmeetrilistest omadustest. Toitepingete asümmeetriat põhjustavad 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 komponendid (trafod, transponeerimata liinid). Lühiajaliste asümmeetriliste seisundite põhjuseks võivad olla rikked – faasijuhtide katkemised või lühised (ühe- ja kahefaasilised lühised, maalühised jaotusvõrgu õhuliinides).

Asümmeetrilist seisundit võib arutada kasutades sümmeetriliste komponentide meetodit, mille kohaselt võib iga kolmefaasilist pingevektorite 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:

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_1} 100\% \text{ ja } K_{0U} = \frac{U_0}{U_1} 100\% .$$

Vastavalt standardile EVS-EN: 50160 peab normaaltalitlustingimustel iga nädalase ajavahemiku kestel 95% toitepinge vastujärgnevuskomponendi  $K_{2U}$  efektiivväärtuse 10-minutilistest keskmistest väärtustest olema maksimaalselt 2% pärijärgnevuskomponendist  $K_{2U} \leq 2\%$ . Paljudes uurimustes soovitatakse asümmeetriategurile poole väiksemat piirväärtust ehk  $K_{2U} \leq 1\%$ . Uurimustes on jõutud järeldusele, et kolmefaasilistes mootorites tekivad lisakaod, kui asümmeetriategur on oluliselt üle 1%, [1, 58, 65, 74, 84]. Standard EVS-EN: 50160 annab väärtused üksnes vastujärgnevuskomponendile, sest just see komponent on võrku ühendatud seadmete võimalike häirete seisukohast ja kolmefaasiliste 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 suur (suurem kui liinijuhi takistus). Niisugune olukord esineb sageli vanemates õhuliinidega võrkudes või hajaasustuse puhul. Kui tavaliselt on asümmeetriateguri väärtus vahemikus 0,5...1,0, siis avariilistes talitlustes esineb ka palju kõrgemaid väärtusi.

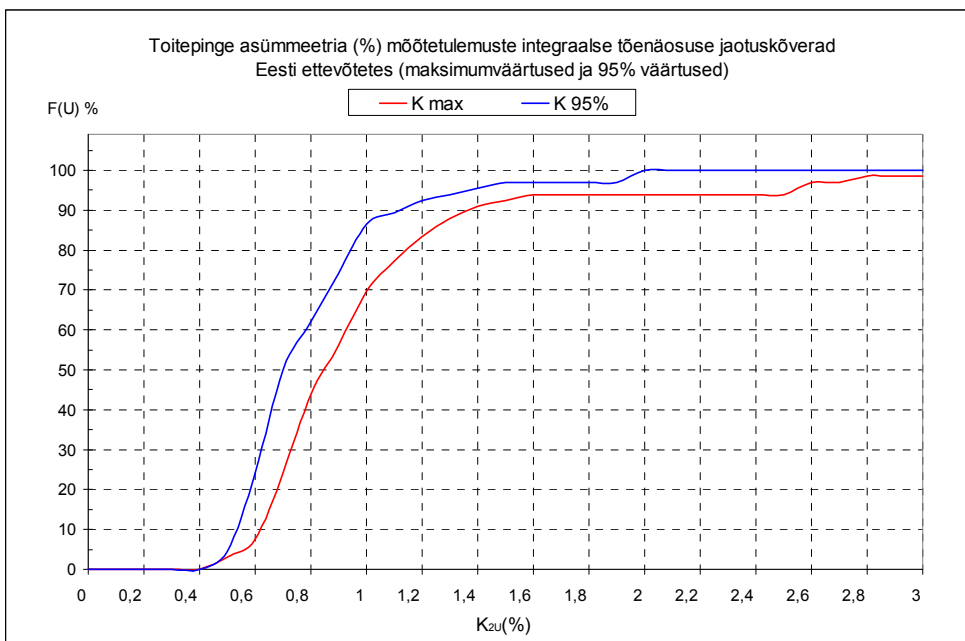
Mõõtmistel registreeritud asümmeetriateguri statistilised arvvaartused on toodud tabelis 3.10, integraalsed tõenäosused joonisel 3.19 ja tõenäosustiheduste jaotuskõverad joonisel 3.20. Näiteid asümmeetrilistest pingeolukordadest faasipingetes 0,4 kV elektrisüsteemides on toodud Lisas C.

Tabel 3.10. Asümmeetriateguri  $K_{2U}$  statistilised arvvaartused

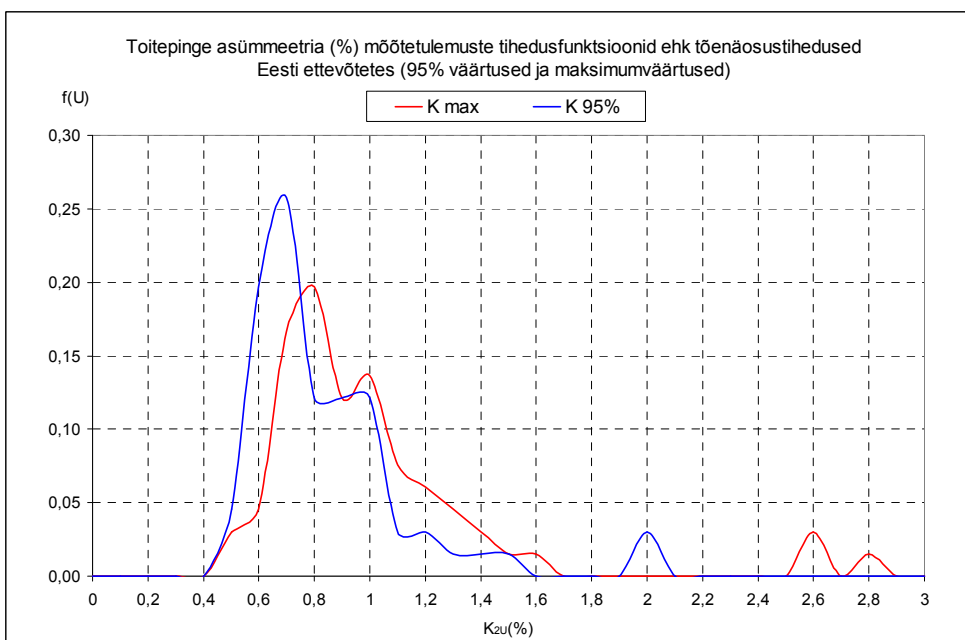
	$K_{2U}$ (max)	$K_{2U}$ (95%)
Mõõtmiste arv	66	66
Dispersioon $D$	0,65	0,30
Keskmine absoluuthälve $K$	0,36	0,20
$K_{2U}$ keskmine väärtus, %	1,0	0,8
$K_{2U}$ miinimumväärtus, %	0,5	0,4
$K_{2U}$ maksimumväärtus, %	5,0	2,0

### Järeldused asümmeetriateguri mõõtetulemuste kohta

1. Asümmeetriateguri  $K_{2U}$  hindamisel saab lähtuda kahest piirväärtusest – kas standardiga EVS-EN:50160 seatud piirväärtusest 2% või soovituslikust piirväärtusest 1%. Asümmeetriateguri maksimumväärtusena ületab 2% piirväärtuse 7% mõõtetulemustest ja 95% väärtusena ainult üks juhust 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 asümmeetria pole otseselt häiriv, siis tarbija elektrisüsteemis jääb see parameeter tähelepanuta, kuni faasipinged jäävad soovitavasse vahemikku. Probleem on sagedasem suure takistusega toiteahelate puhul neutraalitaakistusest tingitud asümmeetria juhul kui faasikoormused pole tasakaalus ning avariilistes talitlustingimustes, mis on lühiajalised. Juhul, kui avariilisi pingeolukordi esineb, on soovitatav elektrisüsteemi kaitsta pingekontrolli juhtreleega.



Joonis 3.19. Toitepinge asümmeetriateguri  $K_{2U}$  registreeritud integraalse tõenäosuse jaotuskõverad Eesti ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides



Joonis 3.20. Toitepinge asümmeetriateguri  $K_{2U}$  registreeritud tõenäosustiheduse jaotuskõverad Eesti ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides



## 3.10 Kokkuvõte ja järeldused

### 3.10.1 Pingetase ja selle hajuvus

Väga oluline on ettevõtetes – tarbijates – teadvustada seost 0,4 kV elektrisüsteemi pingetaseme ehk pingeniivoo ja energiatarbimise vahel ning määratleda antud olukorrale ja elektri-süsteemile ning selle koormustele sobiv (optimaalne) pingetase. Pingetaseme uurimisel on peale arvuliste parameetrite (pinge keskmine, miinimum- ja maksimumväärtus, dispersioon ja keskmine absoluuthälve) soovitatav kasutada tunduvalt ülevaatlikumaid graafilisi esitusviise. Nendeks on:

- toitepinge jaotuse integraalse ehk kumulatiivse tõenäosuse graafikud, millelt on lihtne määrata pinge etteantud tõenäosusega suurust;
- toitepinge tõenäosustiheduse jaotuskõver, mis on sobiv tegeliku jaotuskõvera võrdlemiseks soovitava või standardikohase jaotuskõveraga;
- faasipingete integraalsed jaotuse graafikud keskmise pinge, pinge miinimum- ja maksimumväärtuste kohta;
- pingeerinevuse (pingehälve nimipingest) tõenäosustiheduse ja integraalse jaotuse graafikud;
- toitepinge kõikumise ulatuse (maksimum- ja miinimumpingete vahe) tõenäosustiheduse ja integraalse jaotuse graafikud.

Pingetaseme mõõdetulemused ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides on järgmised. Keskmise pinge miinimumväärtus on olnud 220 V ja maksimumväärtus 248 V. Funktsiooni mood on 235 V ja mediaan 234 V. Pinge kõrgtasemele vastavad 60% mõõdetulemustest, 10% mõõdetulemustest on alla 225 V ja 30% üle 235 V. Seega on keskmine pinge liiga kõrge ületades soovitatavat pingetaset 227...230 V vähemalt 5...6 V võrra, mis vastab toitetrafode astmelüliti ühele astmele 2,5%.

Miinimumpinge madalaim väärtus oli 201 V ja suurim väärtus 238 V, mood 223 V ja mediaan 224 V. Soovitatavalt peaks miinimumpinge jääma vahemikku 207 V kuni 230 V. Maksimumpingete väärtused jäävad vahemikku 220 V...260 V. Mood ja mediaan on ca 240 V. Soovitatavalt peaksid pingete maksimumväärtused jääma vahemikku 230 V...240 V. Seega on nii miinimumpingete kui ka maksimumpingete hajumine suurem kui soovitatav. Põhjusteks on koormuste mittevastavus trafo võimsusele, trafo astme ebasobivus ja reaktiivvõimsuse suur osakaal võimsustarbes ning üksikutel juhtudel ka neutraaliahela liiga suur takistus.

Pingetaseme hajuvus sõltub oluliselt trafo võimsusest. Mida võimsam trafo antud koormuse suhtes on, seda väiksem on pingetaseme hajuvus. Heaks võib pidada hajuvust iseloomustavat keskmist absoluuthälvet kuni 2,5 V, sellele vastab pingetaseme muutumise vahemik piirulukordades (tühijooks/täiskoormus) ca 15 V. Ebasobiv on olukord, kus keskmine absoluuthälve on 5 V ja enam. Sel juhul on pingetaseme muutumise vahemik üle 30 V. Juhul kui pingete suur hajuvus on tingitud neutraaliahela suurest takistusest, tuleb tõenäosustiheduse jaotuskõverad arvutada kindlasti iga faasipinge kohta eraldi, kolme faasipinge keskmise pinge jaotuskõver annab sel juhul vale tulemuse.

Toitepinge taseme keskmine väärtus, hajumine ja eriti selle miinimumväärtused suuremate koormuste ajal sõltuvad oluliselt sellest, kas ettevõttes kasutatakse reaktiiv-võimsuse kompensatsiooni ja kas see on piisav suurimate koormuste piirkonnas. Kui kompensatsioon puudub, on pingetaseme jaotuskõver enamasti kahemodaalne ja tunduvalt suurema hajuvusega, mis kajastub ka suuremas keskmises absoluuthälbes ja dispersioonis. Kompensatsiooni kasutamisega väheneb pingeniivo hajumine tavaliselt 2...3 korda ning keskmine pinge tõuseb.

Registreeritud pingetasemed 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 peaaegu kõik 10 aasta jooksul saadud mõõtetulemused. Tarbijate jaoks on mõtet tingimusel  $P(0,9U_{nimi} < U_i < 1,1U_{nimi}) = 1$ . Lisaks standardis toodud piirväärtuste järgimisele on ettevõtte jaoks kasulik määratleda oma elektrisüsteemile sobiv või optimaalne pingetase, mis võib olla väiksema hajumisega ja ka ebasümmeetrilise paigutusega nimipingega suhtes.

### 3.10.2 Lühiajalised pingehälbed

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 ülekande- ja jaotusvõrgus. Esines 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 ettevõtetes.

Võrgusageduslikke liigpingeid, mis on suuremad kui 1,15 nimipinget, esineb sama ulatusega pingelohkudega võrreldes suhteliselt väga harva. Positiivsetest pingehälvetest ehk 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.

Tavaliselt on ettevõtete jaoks probleemiks just pingelohud, mis näiteks mõnel juhul on sundinud paigaldama ettevõtte toitesisendisse pingekontrolli kontrolleri koos kontaktoriga, mis lahutab elektrisüsteemi võrgust, kui faasipinged väljuvad etteantud vahemikust.

### 3.10.3 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 ka  $THD_u$  tase keskpinge jaotusvõrgus. Pinge harmooniliste moonutuste tõenäosustiheduse jaotuskõveratelt selgub ka, et  $THD_u$  maksimumväärtuste ja ka 95% väärtuste maksimum ehk mood on ligikaudu 3%. Seega on suurel osal elektrisüsteemidest (40%)  $THD_u$  tase suhteliselt madal.

Pinge harmooniliste moonutuste soovitusliku taseme 5% ületavad maksimumväärtusena 30% mõõdetulemustest ning 95% väärtusena 25% mõõdetulemustest. Siit võib teha järelduse, et 25...30 protsendil elektrisüsteemidest on harmooniliste tase toitepinges probleemiks.

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

Pinge harmooniliste moonutuste spektrites on tavaliselt domineeriv 5-s pinge-harmooniline, mis annab sageli 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...0,2%.

### 3.10.4 Pinge värelus ja asümmeetria

Väreluse  $P_{fl}$  maksimumväärtus on allpool standardiga lubatud väärtust 1,0 42 protsendil mõõtevahemikest ja väreluse 95% väärtused jäävad lubatud piiridesse 69 protsendil mõõtevahemikest. Seega uuritud ettevõtetest 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  $P_{fl} = 10...11$  on registreeritud punktkeevitusseadme töö ajal.

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

## **4 Toitepinge kvaliteedi mõju elektritarbimisele ja seadmetele ning sellekohased uurimismetoodika täiendused**

Käesolevas peatükis on antud ülevaade toitepinge kvaliteedi erinevate parameetrite mõjust võimsustarbimisele, võimsuskadudele ja seadmetele. Põhjalikumalt on parameetritest käsitletud toitepinge nivood ja toitepinge harmoonilisi moonutusi kui täiendavate lisakadude olulisemaid põhjustajaid 0,4 kV elektrisüsteemides. Nende parameetrite mõju praktiliseks määramiseks on esitatud kaks mõõtemetoodika täiendust, esimene tarbitava aktiiv- ja reaktiivvõimsuse pingesõltuvuse määramiseks ja teine harmooniliste lisakadude määramiseks ettevõtte 0,4 kV elektrisüsteemis. Kirjeldatud metoodikate peamisteks eelisteks on asjaolu, et mõõtmiste läbiviimine ei häiri kuidagi ettevõtte tööd ning samuti see, et katseid võib teha korduvalt, et mõõtetulemustest kõrvaldada juhuslikud hälbed. Lisaks võimaldavad katsed hinnata ka seda, missugune on kondensaatorseadme kasutamise mõju pingeniivoole, pinge harmoonilistele moonutustele ja ettevõtte võimsustarbimisele üldse ning missugune on kondensaatorseadme kasutamise mõju ettevõttele majanduslikult – kas see on kasulik või hoopis kahjulik.

### **4.1 Toitepinge kvaliteedi mõju elektriseadmetele ja elektritarbimisele**

Elektriseadmete talitus, energiatarbimine, võimsuskaod 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 seadmetes, trafodes ja toiteliinides;
- tööseadmete tootlikkus;
- seadmete talitluse häired ja tõrked ning seadmete tööiga;
- tööseadmega tehtavate toodete või tehnoloogiliste operatsioonide kvaliteet.

Sõltuvalt seadme parameetritest ja funktsioonidest võib olulisem olla üks või teine ülaltoodud teguritest. Näiteks kui elektroonikatööstuses on kõige olulisem häiringu-kindlus. 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 olulised energiatarbimine ja võimsuskaod mootorites ning samuti toiteahelas (liinides, trafos). Puidutööstuses kasutatav saagimisliin võib sisaldada kuni 10 mootorit võimsusega 30...90 kW.

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

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

Nendest kõige olulisemad on pingeniivo parameetrid ja pinge ning voolu harmoonilised moonutused. Kolmefaasiliste elektriseadmete talitlust samuti mõjutav pingete märkimisväärne asümmeetria (üle 1%) esineb harva ja/või lühiajalistes avariitalitlustes. Pingelohud ja katkestused põhjustavad lisakadusid kaudselt juhul, kui need on sagedased (näiteks iga nädal) ning kui nende tagajärjel tekib tootmises seisak, kus seadmed töötavad tühikäigul ning kulub teatud aeg tootmise uuesti käivitamiseks. Toitepinge kvaliteedi erinevad parameetrid mõjutavad elektritarbimist ja tarbija seadmeid erinevalt ning sageli võib toitepinge kvaliteedi mõju jääda märkamatuks. Vaatleme järgnevalt üksikute pingekvaliteedi parameetrite mõju võimsuse tarbimisele ja seadmetele.

#### **4.1.1 Toitepinge nivoo probleemi aktuaalsus ja pingeniivo reguleerimise vahendid**

Toitepinge optimaalse nivoo valiku probleem on aktuaalne ja pingeniivo optimeerimine ehk reguleerimine (*voltage optimisation, voltage regulation*) on sageli kasutatav abinõu tarbitava võimsuse reguleerimisel paljudes maades, [27, 59, 64, 65, 78]. Ühelt poolt põhjustab seda elektrienergia üha kasvav hind, teiselt poolt aga võimsuse puudujääk tipukoormuse ajal ja energia hinna hüppeline kasv sellistes tingimustes.

Pingeniivo optimeerimise tulemusi näiteks Hollandi jaotusvõrgus on käsitletud uurimuses [6, 110]. Nimipinge ja soovituslikud pingehälbed on Hollandis alates 2005. aastast  $230/400 \pm 6\%$ . Pingeniivo optimeerimisel lähtuti neljast koormusolukorrast: miinimum- ja maksimumkoormus talvel ja suvel. Pinge reguleerimiseks jaotusvõrgus kasutati trafode astmelülitite seadistamist, trafode vahetust (kui trafol ei jätkunud astmeid või trafo ergutus oli liiga kõrge) ja jaotusvõrgu konfiguratsiooni muutmist. Ümberkorraldatud jaotusvõrgus, mis hõlmas 590 000 klienti koguvõimsusega 430 MW, vähendati pingeniivod keskmiselt 2%, mille tulemusena vähenes tarbitav aktiivvõimsus 3,5%. Pingeniivo jäi kõigis alajaamades ja trafo-punktides ettenähtud vahemikku. Keskpingel oli keskmine pinge 10,6 kV.

Toitepinge nivoo optimeerimine on aktuaalne USA-s, kus on läbi viidud mitmeid uuringuid tarbijate võimsuse pingesõltuvuse alal, [59, 65, 75]. Pingekõikumiste lubatud vahemikud sätestatakse standardiga ANSI C 84.1. Praktikas püüab enamik USA elektrivõrke hoida pinget piirides  $\pm 3\%$  nimipingest.

Saksamaal tehtud pingeniivo uuringutest on selgunud, et tööstustarbija pinge optimeerimisega vähenes energiakulu kuus keskmiselt 11%, [78].

Ühendatud Kuningriigis (UK) on toitepinge nivoo optimeerimine eriti aktuaalne, sellega tegelevad mitmed ettevõtted, näiteks Hughes Energy ja Power Perfector. Nende tegevuse ülevaates märgitakse, et pinge optimeerimisega saavutatav sääst elektrikuludes on paljudel juhtudel kuni 15%. Pinge on UK-s kõrge kahel põhjusel – esiteks selleks, et kompenseerida pingelangusid madalpinge jaotusvõrgus, teiseks toitepinge harmoniseerimise tõttu kogu Euroopa Liidus. Nimelt oli varem nimipinge UK-s 240 V, paljudes teistes EL riikides aga 220 V. Praegu on näiteks

keskmine pinge UK-s 242 V ja Iirimaal 235 V. Optimaalse pingeniivo tagamiseks kasutab Power Perfector kas trafo astme valikut, püsiva ülekandesuhtega lisatrafot, mis vähendab ka siirdeliigpingete mõju ja pinge harmooniliste moonutuste ulatust, või pinge regulaatorit (stabilisaatorit). Pinge optimeerimisalane tegevus on UK-s väga populaarne, sellest annab tunnistust fakt, et ettevõtte Power Perfector valiti 2010. aastal parimate energiasäästu ettevõtete hulka.

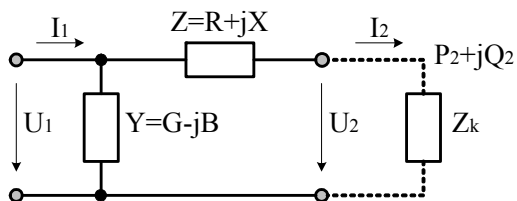
Pingeniivo reguleerimise enamlevinud vahendid on:

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

Toitepinge niivo reguleerimine keskpinge jaotusvõrkudes ja madalpinge elektrisüsteemides koos reaktiivvõimsuse kompensatsiooniga on üks olulisemaid abinõusid elektritarbimise optimeerimisel. Neid kahte tuleb uurida ja rakendada üheskoos, sest reaktiivvõimsuse kompensatsioon mõjutab otseselt ka toitepinget.

#### 4.1.2 Toitepinge niivo mõju võimsuskadudele liinides, trafodes ja mootorites

Elektritarbimist kõige otsesemalt mõjutav parameeter on toitepinge niivo. Toitepingest sõltuvad nii tarbitav aktiiv- ja reaktiivvõimsus kui ka võimsuskaod. Tavaliselt suureneb koos pingetõusuga ettevõtte 0,4 kV elektrisüsteemis ka tarbitav vool ja seetõttu suurenevad kaod elektriseadmetes. Toitepingest sõltuvad võimsuskaod liinides, trafodes ja mootorites. Võimsus- ja energiakadude arvutamiseks lähtutakse kõige lihtsamal juhul jada- ja rööpharust koosnevast aseskeemist ehk neliklemmist, nagu näidatud joonisel 4.1, [87]:



Joonis 4.1. Neliklemmi skeem võimsuskadude arvutamiseks

Aktiiv- ja reaktiivvõimsuskaod ülaltoodud aseskeemis avalduvad tuntud seostest:

$$\begin{cases} \Delta P = 3I_2^2 R + U_1^2 G \\ \Delta Q = 3I_2^2 X + U_1^2 B \end{cases} \quad (4.1)$$

Energiakaod  $\Delta W$  perioodi  $T$  vältel määratakse võimsuskadude integreerimise teel:

$$\Delta W = \int_0^T \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} R dt + \int_0^T U_1^2 G dt = \Delta W_R + \Delta W_G. \quad (4.2)$$

Avaldise esimene liige ehk kaod aseskeemi aktiivtakistuses määratakse koormusgraafikute  $P = f(t)$  ja  $Q = f(t)$  integreerimise teel:

$$\Delta W_R = \frac{R \Delta t}{U_{2kesk}^2} \left( \sum_{i=1}^n P_{2i}^2 + \sum_{i=1}^n Q_{2i}^2 \right), \quad (4.3)$$

kus  $U_{2kesk}$  – perioodi  $T$  keskmine pinge,

$\Delta t$  – ajavahemik ja  $n$  – ajavahemike arv perioodi  $T$  vältel.

Avaldise teine osa ehk kaod aseskeemi rööpharus on arvatav järgmiselt:

$$\Delta W_G = \int_0^T U_1^2 G dt = G \cdot U_{1kesk}^2 T. \quad (4.4)$$

Praktilisteks arvutusteks on tuntud lihtsustatud seosed [106], kus võimsuskaod liinides sõltuvalt pingest arvutatakse järgmiselt:

$$\begin{cases} \Delta P_L = R_L P^2 / U_2^2 + R_L Q^2 / U_2^2 \\ \Delta Q_L = X_L P^2 / U_2^2 + X_L Q^2 / U_2^2 \end{cases}, \quad (4.5)$$

kus  $R_L$  ja  $X_L$  – liini aktiiv- ja reaktiivtakistused,

$P$  ja  $Q$  – liinis ülekantavad aktiiv- ja reaktiivvõimsused.

Trafo aktiiv- ja reaktiivvõimsuskaod  $\Delta P_{tr}$  ja  $\Delta Q_{tr}$  sõltuvad pingest järgmiselt:

$$\begin{cases} \Delta P_{tr} = P_{ij} + k_k^2 \Delta P_k = G_T U_2^2 + R_T S^2 / U_2^2 \\ \Delta Q_{tr} = Q_{ij} + k_k^2 \Delta Q_k = B_T U_2^3 + X_T S^2 / U_2^2 \end{cases}, \quad (4.6)$$

kus  $\Delta P_k$  ja  $\Delta Q_k$  – trafo koormuskaod,

$\Delta P_{ij}$  ja  $\Delta Q_{ij}$  – trafo tühijooksukaod,

$G_T, R_T, B_T, X_T$  – trafo takistused ja juhtivused aseskeemis,

$k_k$  – trafo koormustegur,  $k_k = (S_2 / S_{2nimi})^2$ .

Võimsuskaod mootorites  $\Delta P_m$  ja  $\Delta Q_m$  sõltuvad pingest järgmiselt:

$$\begin{cases} \Delta P_m = \Delta P_{ij} U_2^2 + \Delta P_k k_k^2 / U_2^2 \\ \Delta Q_m = Q_{ij} (1 - k_k^2) U_2^3 + k_k^2 Q_k / U_2^2 \end{cases}, \quad (4.7)$$

kus  $\Delta P_{ij}$  ja  $\Delta P_k$  – aktiivvõimsuskaod mootori tühijooksul ja koormusel,

$Q_{ij}$  ja  $Q_k$  – reaktiivvõimsus mootori tühijooksul ja koormusel,

$k_k$  – mootori koormustegur.

### 4.1.3 Toitepinge harmooniliste moonutuste mõju tarbijatele

Voolu ja pinge harmooniliste moonutuste mõju elektritarbimisele ja elektriseadmetele on uuritud intensiivselt paljudes riikides, eriti viimase 20...30 aasta vältel. Väga intensiivselt on avaldatud uurimistulemusi, väitekirju, monograafiaid ja õpikuid [22, 30, 105, 106, 108], juhiseid ja standardeid [24, 40, 41, 42, 46, 47] ning uurimistulemusi harmooniliste moonutuste tekkepõhjuste ning nende mõju kohta elektriseadmetele [4, 9, 36, 48, 69, 107], samuti harmooniliste lisakadude määramise ja vähendamise kohta üldiselt [12, 13, 14, 28, 29, 32, 39, 55, 56, 57, 79, 90, 92, 109]. Harmooniliste moonutuste mõju uurimistulemusi erinevatele seadmeliikidele on toodud – trafodes [23, 46, 53], mootorites [1, 15, 34, 52], kaablites [16, 19, 20, 21] ja kondensaatorites [25, 26, 44]. Sellele vaatamata puudub autorile teadaolevalt praegu siiski hõlpsasti kasutatav meetodika harmooniliste lisakadude arvutamiseks või mõõtmiseks ettevõtete elektrisüsteemides tervikuna. Samuti on toitepinge harmooniliste moonutuste tekkemehhanism, selle mõju tarbija elektriseadmetele ja moonutuste vähendamise võimalused ettevõtetes hägused ning vajavad täpsustamist.

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

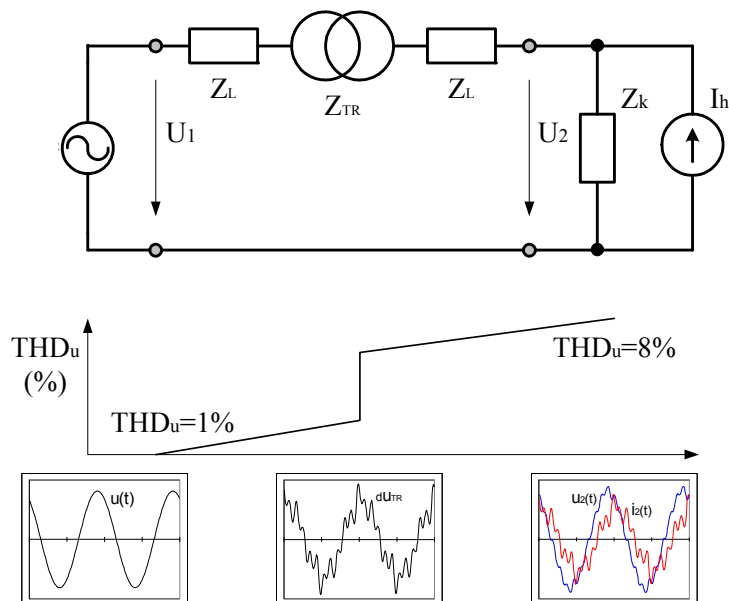
- resonantsinähud mingil harmoonilisel sagedusel, millega kaasnevad liigvoolud ja -pinged elektrisüsteemi osades ning liigkoormus ja ülemäärane kuumenemine elektriseadmetes;
- kaitse- ja juhtsüsteemide häiringud ja tõrked, näiteks kaitseülilite väär rakendumine;
- sideliinide ja -süsteemide häiringud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

### Harmooniliste pingemoonutuste tekkemehhanism ja üldiseloostus

Ettevõtte elektrisüsteem koosneb tavaliselt suurest hulgast mootoritest, trafodest, kaablitest, valgustitest, muunduritest, kütteseadmetest ja kondensaatoritest. Osa neist seadmetest on lineaarse, osa aga ebalineaarse voolu-pingetunnusjoontega. Kuna ebalineaarsed seadmed (alaldid, sagedusmuundurid) tarbivad mittesiinusetulist voolu, siis on ka pinge ettevõtte elektrisüsteemis mittesiinusetuline, sest pingelang toiteahelas (peamiselt trafos) on mittesiinusetuline. Harmooniliste pingemoonutuste taseme muutust allikast kuni tarbijani kujutab joonis 4.2. Pingemoonutused kasvavad piki liini allikast tarbija suunas ja suurenevad hüppeliselt trafo näivtakistusel, kuna see on oluliselt suurem kui liinide takistus. Moonutatud voolukõver tarbija ahelas põhjustab pingelangu toiteahela näivtakistusel ning see pingelang on samuti moonutatud kujuga. Järelikult on moonutatud ka toitepinge tarbija liitumispunkti.



Mida suurem on moonutatud vool ja mida suurem on toiteahela näivtakistus, seda suuremad on ka pingemoonutused.



Joonis 4.2. Pinge harmooniliste moonutuste  $THD_u$  suurenemine piki toiteahelat allikast tarbijani

Harmoonilised pinged ja voolud on üldjuhul ajas pidevalt ja kiiresti muutuvad suurused, seda järgmistel põhjustel:

- harmoonilisi moonutusi põhjustavate seadmete arv ja nende koormus ning talitus muutub ajas pidevalt suurtes piirides;
- antud elektrisüsteemi ja ka toitevõrgu konfiguratsioon muutub pidevalt;
- süsteemi lülitatud kondensaatorite koguvõimsus muutub vastavalt kompensermisseadme tööle, seega muutub pidevalt ka süsteemi näivtakistus erinevatel sagedustel (muutub süsteemi sageduskarakteristik).

See tähendab, et harmooniliste spektri ajas püsivat koosseisu ettevõtte elektri süsteemi jaoks üldjuhul ei eksisteeri. Kui on tegemist ainult ühe muunduriga, mille koormuseks on ajas püsiva tarbimisega seade (näiteks luminofoorlamp, konditsioneer), siis võib sagedusspekter olla ka püsiva koosseisuga. Harmooniliste spektri koosseisu muutumist ajas on analüüsitud töödes [13, 14, 30, 109]. Käesoleva töö käigus läbi viidud mõõtmised näitavad, et ettevõtetes on voolu ja pinge harmooniliste koosseisu ja ulatuse muutused suuremad kui ülalviidatud töödes. Näiteks muutub reaalse ettevõtte 0,4 kV elektrisüsteemis  $THD_i$  piirides 10...90% ja  $THD_u$  piirides 2...16%.

## Harmoniliste voolude allikad

Harmoniliste voolude allikaks on kõik siinusest erineva voolukujuga seadmed, mille pingevoolutunnusjoon on ebalineaarne. Sellised on näiteks kõik alaldid, muundurid ja magnetahela küllastusega seotud ferromagnetseadmed. Muundurites on laialt levinud 6-pulsilised ja 12-pulsilised kolmefaasilised alaldid (diiod- või türistoralaldid). Niisugused muundurid genereerivad harmoonilisi järguga  $h = kp \pm 1$ , kus  $p$  – muunduri faaside arv ja  $k = 1, 2, 3, \dots$ . Seega 6-pulsilised muundurid genereerivad harmoonilisi järguga  $h = 5, 7, 11, 13$  jne ja 12-pulsilised muundurid harmoonilisi järguga  $h = 11, 13, 23, 25$  jne. Muunduri  $h$ -ndat järku harmoonilise voolu arvutamiseks on toodud ka empiiriline seos, [106]:

$$I_h \cong k_k S / \sqrt{3} U_{nimi} h, \quad (4.8)$$

kus  $S$  on muunduri võimsus,  $k_k$  – koormustegur.

Seega on 6-pulsiliste muundurite voolus tavaliselt 20% 5-ndat harmoonilist, 13% 7-ndat, 9% 11-ndat jne. Sageli kasutatakse ka ühefaasilise tarbija (näiteks kütte seadme) võimsuse reguleerimist türistoride avamisinga muutmisega türistorvõtme abil. Selline lülitus genereerib paaritud harmoonilisi  $h = 3, 5, 7$  jne.

Ühe moonutatud voolukõveraga elektritarviti võimsus võib olla väga väike. Näiteks kompaktluminofoorlampide võimsused on vahemikus 3...25 W. Kui aga selliste elektriseadmete hulk on väga suur ja kui nende vooluharmonilised liituvad samas faasis, siis võivad nad põhjustada märgatavaid moonutusi toitevoolus. Seoses üleminekuga kompaktluminofoorlampidele on uuritud nende mõju toitepinge kvaliteedile jaotusvõrgus alates 1990-ndate aastate algusest, [36, 69]. Kompaktlampide vool sisaldab harmoonilisi komponente väga suurel määral, harmooniliste kogumoonutus voolus  $THD_i$  võib ulatuda 150%-ni, voolu kolmandat harmoonilist võib olla 60...80%, viiendat 20...40%, seitsmendat 20...30% jne, [36]. Kuigi tegemist on väga väikeste vooludega, tavaliselt 100...200 mA, ja hõõglampide väljavahetamisel kompaktlampide vastu pingemoonutused ei suurene, suurenevad voolu suhtelised moonutused kindlasti.

## Harmoniliste pingete ja voolude lubatavad piirväärtused

Pikaajaliste uurimistööde ja praktika käigus on välja töötatud sellised pingepinge- ja vooluharmoniliste piirväärtused, mille puhul loetakse, et harmoonilised lisakaod on vastuvõetavad. Need piirväärtused on toodud vastavates standardites, [24, 40, 41, 42, 47]. Standard EVS-EN 50160 sätestab nõuded pingeharmonilistele, standard IEC 61000-2-4:2002 sätestab ühilduvustasemed madalsageduslikele juhtivushäiringutele, standard IEC 61000-3-2 suurimad lubatavad vooluharmonilised seadmetele nimivooluga kuni 16 A ja standard IEC 61000-3-4 lubatavad vooluharmonilised seadmetele nimivooluga üle 16 A. Lubatav vooluharmoniliste määr seadmetele nimivooluga üle 16 A sõltub süsteemi lühisvõimsusest.

IEEE standardis 519 on toodud tunduvalt rangemad vooluharmoniliste piirmäärad üldjaotusvõrkudes lähtudes süsteemi lühisvoolu ja liinivoolu suhtest  $I_{SC}/I_L$ , kus  $I_{SC}$  on süsteemi lühisvool liitumispunktis ja  $I_L$  on suurim lubatav liinivool ajavahemiku

keskmisena, tabel 4.1. Lähtudes tabelist 4.1 ei tohi kõige väiksema lühisvõimsusega võrgus voolu kogumoonutused  $THD_i$  ületada 5% ja kõige suurema lühisvõimsusega võrgus 20%.

Tabel 4.1. IEEE 519 vooluharmoniliste piirmäärad 120 V...69 kV üldjaotusvõrkudes

$I_{SC}/I_L$	$I_h/I_L, \%$					$THD_i$ (%)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq$	$h > 35$	
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5
20...50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8
50...100	10	4,5	4,0	1,5	0,7	12
100...1000	12	5,5	5,0	2,0	1,0	15
> 1000	15	7,0	6,0	2,5	1,4	20

Suure võimsusega, alates 375 kW, sagedusmuundurite jaoks on USA-s välja töötatud eraldi standard IEEE Std. 1566. Peaaegu eranditult kasutatakse selliste muundurite sisendis eraldustrafot või reaktorit, et vähendada vooluharmonilisi ja lühisvoolusid, [68].

Seega sõltub lubatav vooluharmoniliste määr antud toiteahela lühisvõimsusest. Orienteerivaks voolu harmooniliste moonutuste piirväärtuseks võib lugeda  $THD_i$  suurus 20%, millest suuremate väärtuste puhul on moonutuste tase kõrge.

#### 4.1.4 Harmoonilised lisakaod elektriseadmetes

Harmoonilised lisakaod elektriseadmetes on kaod, mille põhjuseks on toitepinge ja liinivoolu harmoonilised moonutused. Need moonutused on üldjuhul tingitud ettevõtte enda ebalineaarsetest seadmetest, mis tarbivad ka siinuselise toitepinge korral mittesiinuset voolu. Kui toitepinge harmoonilised moonutused on väga väikesed,  $THD_u \approx 0,5...1,5\%$ , siis on ka harmoonilised lisakaod mootorites ja trafodes tühised. Harmooniliste lisakadude hindamisel saame lähtuda pinge- ja voolukõvera moonutustest, mida iseloomustavad parameetrid  $THD_u$  ja  $THD_i$  ning üksikute harmooniliste pingete ja voolude väärtused  $U_h$  ja  $I_h$ . Ettevõtte huvides on kasulik teada, kui suured on harmoonilised lisakaod, mida saab ette võtta nende vähendamiseks ning milline on abinõude tasuvus? Lisakaod harmoonilistest pingetest esinevad mootorites, trafodes, kaablites ja kondensaatorites. Nende lisakadude arvutamiseks on seosed olemas, [22, 30, 48].

#### Harmoonilised lisakaod liinides

Voolu harmoonilised moonutused põhjustavad lisakadusid liinides. Juhul, kui liinivool sisaldab peale põhisageduse ka kõrgemaid sagedusi, suureneb ka voolu efektiivväärtus ja suurenevad kaod liinis sõltuvalt voolu harmooniliste kogumoonutusest järgmiselt:

$$P_{kaod} / P_{kaod1} = 1 + THD_i^2, \quad (4.9)$$

kus  $P_{kaod1}$  on kaod põhisagedusel 50 Hz.

Seega, kui näiteks  $THD_i = 100\%$ , siis  $P_{kaod}/P_{kaod1} = 2$  liinijuhtide puhul. Järelikult peaksid liinijuhid sel juhul olema ca 1,5 korda suurema ristlõikega ja neutraaljuht ca 2 korda suurema ristlõikega. Kui aga  $THD_i = 30\%$  (mis esineb väga sageli), siis  $P_{kaod}/P_{kaod1} = 1,1$  ehk kaod on ca 10% suuremad kui põhisagedusel.

Harmoonilised lisakaod kaablites, kui kaablisooit läbivad põhisagedusest kõrgema sagedusega voolud tekivad pinnaefekti tõttu kaablisooites. Voolu harmooniliste moonutuste mõju kaablikadudele on uuritud töödes [16, 19, 20, 21]. Kolmefaasilises neljajuhtmelises süsteemis avalduvad kaod kaablis järgmiselt (arvestatakse kadusid ainult kaablisooites):

$$\Delta P_h = \sum_{c=1}^n \sum_{h=1}^{40} R_{ch} I_{ch}^2, \quad (4.10)$$

kus  $R_{ch}$  – kaablisooite takistus harmoonilisel sagedusel  $h$ ,

$I_{ch}$  – vooluharmooniline ühes kaablisooites sagedusel  $h$ .

Ülalviidatud uurimused näitasid, et võimsuskadod kaablites mittesiinuselise voolu korral, mille spekter on iseloomulik 6-pulsilistele alalditele, on ca 40% suuremad kui siinuselise voolu korral.

### Harmoonilised lisakaod trafodes

Trafodes põhjustavad harmoonilised moonutused lisakadusid nii mähistes pinnaefekti ja voolu ebahürtlase jagunemise tõttu kõrgematel sagedustel kui ka magnetahelas suuremate hüstereesikadude ja pöörivoolukadude tõttu. Tugevasti moonutatud voolu puhul ei ole võimalik ära kasutada trafo kogu nimivõimsust, tegelikult kasutatav võimsus on sõltuvalt harmooniliste voolude tasemest sellest 10...20% võrra väiksem. Trafo lisakadude arvutamiseks on olemas erinevaid meetodikaid, [30, 46]. Enamlevinud meetodika puhul kasutatakse tegurit  $K$  ( $K$ -factor), mis iseloomustab trafokadude suhet moonutatud voolu ja siinuselise voolu korral ning arvutatakse järgmiselt:

$$K = \sum_{h=1}^{h_{\max}} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^2. \quad (4.11)$$

Teguri  $K$  alusel toimub trafo kasutatava võimsuse taandamine nimivõimsusest allapoole (*transformer derating*). Jaotusvõrgu trafode harmooniliste lisakadude arvutamiseks on toodud näiteks järgmine empiiriline arvutusseos, [106]:

$$\Delta P_h = 10^{-4} S_{nimi} 0,3 \sum_{h=2}^h \frac{U_h^2}{h \sqrt{h}}. \quad (4.12)$$

Mitmed uurimused viitavad, et kui pingemoonutuste ulatus on  $THD_u \approx 10\%$ , suurenevad trafokaod kuni 20%.

### Harmoonilised lisakaod mootorites

Tööstusettevõtetes on tarbimises enamasti suur osa asünkroonmootoritel. Toitepinge kõrgemad harmoonilised põhjustavad asünkroonmootoris täiendavat kuumenemist, lisakadusid ning pöördemomendi ja tööea vähenemist.

Moonutatud kujuga pingekõver mootori klemmidel põhjustab lisakadusid nii mähistes kui ka magnetahelas, [30]. Harmoonilised lisakaod mähistes on oomilised kaod ehk Joule'i kaod. On näidatud, et madalamat järku  $f_h \leq 1500$  Hz harmoonilistel vooludel on siin suurem osa. Lisakaod magnetahelas ehk rauaskaod koosnevad hüstereesikadudest ja pöörivoolukadudest, kusjuures hüstereesikadude ja harmoonilise sageduse vaheline sõltuvus on võrdeline, pöörivoolukaod sõltuvad sageduse ruudust.

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

$$\Delta P_h = \Delta P_{Cuh} + \Delta P_{Feh} + \Delta P_{momenth}, \quad (4.13)$$

kus  $\Delta P_{Cuh}$  mootori täiendavad vaseskaod harmoonilistest;

$\Delta P_{Feh}$  mootori täiendavad rauaskaod harmoonilistest;

$\Delta P_{momenth}$  mootori pöördemomendi kaod harmoonilistest.

Pinge harmooniliste moonutuste ja asümmeetria koosmõju mootorite tööeale on uuritud töödes [1, 4, 15, 34, 52]. Uurimustes on kindlaks tehtud, et toitepinge asümmeetria ja harmooniliste moonutuste mõju sõltub mootori konstruktsioonist, jahutusest, staatori ja rootori aktiiv- ja reaktiivtakistustest erinevatel harmoonilistel sagedustel. Mootorid modelleeriti püsikoormusel koormusteguriga 75% ja keskkonna temperatuuril +30 °C. Katsetes eeldati, et juhul, kui mootori pinge on siinuseline ja ideaalselt sümmeetriline, on mootori tööiga 20 aastat.

Tabel 4.2. Mootorite tööea lühenemine (%) aastates [1]

Mootori võimsus, (HP)	Asümmeetria-tegur, $K_{2U}$ (%)	$THD_u = 0\%$	$THD_u = 3\%$	$THD_u = 6\%$	$THD_u = 10\%$
10	1	1,0	1,9	4,8	10,8
10	2	4,0	4,9	7,8	13,8
100	1	1,2	2,6	6,6	13,4
100	2	5,0	6,3	10,4	17,0

Uuringust selgub, et mootorite tööiga väheneb oluliselt, kui asümmeetria suureneb ühelt protsendilt kahele ning harmooniliste moonutuste osa suureneb kolmelt protsendilt kümnele.

### Harmoonilised lisakaod kondensaatorites

Pinge harmoonilised moonutused halvendavad oluliselt ka kondensaatorite töötingimusi, suurenevad liinivool ja kaod, tõuseb kondensaatori temperatuur ja vähe-

neb tööiga (kuna kiireneb dielektrilise materjali vananemine). Lisakadude arvutamist kondensaatorites vaadeldakse edaspidi.

### **Harmoniliste moonutuste vähendamise võimalused**

Harmoniliste moonutuste piiramiseks on järgmised võimalused:

- toiteahela lühisvõimsuse (eeskätt trafo võimsuse) suurendamine ja võimalusel toiteskeemi ümberkorraldamine selliselt, et mittelineaarsed tarbijad on lineaarsetest tarbijatest lahutatud;
- kolmandat järku harmoniliste filtreerimine (elimineerimine) trafo mähiste sobiva lülitusgrupiga; trafo üks mähis peab olema kolmnurklülituses või sikk-sakkühenduses, et selles sulguksid kolmanda harmonilise voolud; selleks võib olla isegi eraldiseisev 0,4/0,4 kV trafo;
- passiivfiltrite kasutamine, mille näivtakistus on teatud harmonilisel sagedusel väga väike; passiivfiltreid saab kasutada ettevõtte, kes on ainus alajaama tarbija; kui alajaamal on mitu ettevõtet, hakkab passiivfilter „neelama“ teiste tarbijate vooluharmonilisi;
- aktiivfiltrite kasutamine, milles muundur genereerib sellise kujuga voolukõvera, mis tarbija voolukõveraga liitumisel annab siinuskõvera – see on väga kallis lahendus;
- niisuguste muundurite ja alaldite kasutamine, mille voolukõver on siinuselähedase kujuga, väikeste moonutustega ning mille võimsustegur on kõrge; selliseid muundureid ja alaldeid on põhjalikult uuritud TTÜ Elektrotehnika aluste ja elektrimasinate instituudis, [50, 57, 68, 90].

#### **4.1.5 Pingete asümmeetria mõju võimsuskadudele elektriseadmetes**

Asümmeetriline pingepõhjustab asünkroonmootorites täiendavaid võimsuskadusid. Asümmeetria mõju võimsuskadudele mootorites on uuritud töödes [1, 30, 58, 97, 106]. Asümmeetria korral liitub mootori põhimomendile täiendav vastupidine moment ning resulteeruv moment  $M$  on seetõttu nimimomendist väiksem. Kuumenemine tuleneb asjaolust, et asünkroonmootorite vastujärgnevustakistus  $Z_2$  on kordades väiksem kui pärijärgnevustakistus  $Z_1$  ja isegi väikese vastujärgnevuspinge  $U_2$  puhul tekib arvestatav vastujärgnevusvool  $I_2$ . See vool liitub pärijärgnevusvooluga ja põhjustabki mootori kuumenemist. Uurimused on näidanud, et kui pingete asümmeetria on 4%, väheneb asünkroonmootori tööiga kaks korda. Täiendavad kaod pingete asümmeetriast asünkroonmootoris on arvutatavad valemiga [30, 106]:

$$\Delta P_{asüm} \approx P_M \cdot K_{2U}^2 = k \cdot P_M \cdot K_{2U}^2, \quad (4.14)$$

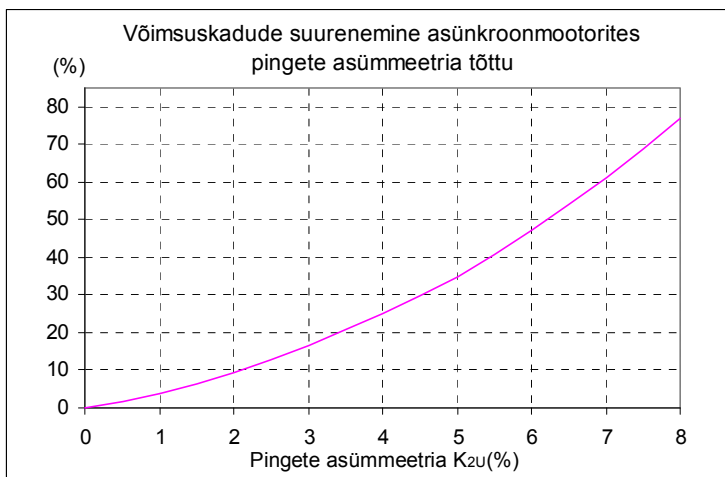
kus  $P_M$  – mootori võimsus,

$K_{2U}$  – vastujärgnevuspinge tegur.

Seega sõltuvad mootori lisakaod asümmeetriategurist ruudus, nagu on näidatud ka joonisel 4.3.

Kondensaatorseadmed on asümmeetrilise pingepuhul faaside suhtes ebaühtlaselt koormatud ning suurendavad veelgi asümmeetriat, kuivõrd reaktiivvõimsuse

genereerimine sõltub pinge ruudust. Täiendavad kaod kondensaatoris pingete asümmeetriast on samuti võrdelised kondensaatori võimsusega ja asümmeetriateguri ruuduga.



Joonis 4.3. Lisakaod mootoris sõltuvalt pingete asümmeetriast, [97]

Asümmeetrilised voolud liinides ja trafodes põhjustavad samuti lisakadusid. Lisakadude suurus sõltub faasivoolude ebaühtlusest ja faasi- ning neutraaljuhtide takistusest. Üldiselt on tunnustatud seisukoht, et kui pingete asümmeetriategur  $K_{2U} \leq 1\%$ , siis on lisakaod tühiselt väikesed. Kui asümmeetria tegur  $K_{2U} = 2\%$  või on sellest kõrgem, siis suurenevad kaod oluliselt. Seetõttu on ka standardites sätestatud asümmeetria lubatavaks piirväärtuseks 2%.

#### 4.1.6 Pingelohkude mõju elektriseadmetele ja nende vähendamise võimalused

Ettevõtte 0,4 kV elektrisüsteem sisaldab erinevaid seadmeid – muundureid, otse-lülituses asünkroonmootoreid, kontaktoreid, valgusteid ja kütteseadmeid. Pingelohkude häiriv mõju neile seadmetele on erinev sõltuvalt pingelohu kestusest ning sellest, kas lohk esines ühes, kahes või kolmes faasis. Sageli on vastavust pingelohkude ja seadmete tõrgete vahel raske tõestada.

Pingelohkude mõju muunduriga ajamitele, asünkroonmootoritele ja kontaktoritele on uuritud töödes [7, 10, 17, 18, 38, 17]. Järeldustena on välja toodud, et pingelohu tõttu võivad sagedusmuunduriga ajamis tekkida liigvoolud ja mootoris momendi fluktuatsioonid. Toite katkestuse korral kaob pinge alaldi alalisvoolupoolel mõne perioodiga. Muundurites tekib pinge kiirel taastumisel suur vooluimpulss, mis võib seadet (diodid, trükkplaat) kahjustada, kuni alaldi kondensaator pole tühjaks laadunud ja seade välja lülitunud. Mootori klemmidel kahaneb pinge aeglaselt, sõltudes mootori ja ajami inertsist, tavaliselt 0,2 kuni 1 s vältel. Sel juhul ei tohi kasutada automaatset taaskäivitust, sest võivad tekkida kuni 10-kordsed liigvoolud. Liigvoolu saab vältida, kui kasutada staatori jääkpinget ja võrgupinget sünkroni-

seerivat inverterit. Soovitatakse ka kasutada ühist alaldit mitme inverteri toiteks (*common DC bus*).

Ajami juhtimise algoritm peab ühest küljest püüdma säilitada ajami tööd pingelohkude ajal, teisest küljest aga kaitsma seadmeid liigvoolude ja -pingete kahjuliku mõju eest. Kõige kindlam viis voolutõugete ja liigpingete vältimiseks on ajami väljalülitamine (*clean stop*), mille järel toimub kas käsitsi või automaatne taaskäivitus alles peale etteantud viiteaja möödumist.

Kontaktoritele on pingelohkude mõju otsene – kontaktorid lülituvad välja, kui pingelohk on sügavusega 30% või enam ja kestusega üle 1 kuni 2 perioodi. Asünkroonmootorid on suhteliselt lihtsa ehitusega ja pingelohkudele vähetundlikud. Lühiajaline momendi vähenemine pole tavaliselt probleemiks, kuna mootorid on enamasti alakoormatud (sageli alla 60%) ning ajamid suure inertsiga. Kui asünkroonmootor lülitatakse välja, jääb tema klemmidele lühikeseks ajaks teatav jääkpinge (*residual voltage*). Aeg, mil pinge mootori klemmidel väheneb nullini (*open circuit time constant*) võib olla mõnest kümnendikust kuni mõne sekundini sõltuvalt mootori inertsist. Kui mootor ühendatakse võrguga enne, kui jääkpinge on jõudnud nullini, tekivad elektrilised ja mehaanilised siirdeprotsessid. Tekkivad liigvoolud võivad olla käivitusvoolust suuremad, kui võrgupinge ja jääkpinge liituvad vastandfaasis. Liigvoolud võivad kahjustada mootorit ja kaitseseadmeid.

Pingelohkude mõju USA tööstusettevõtetes on käsitletud artiklis [17], kus on välja toodud, et uuritud ettevõtetes esines 8...24 pingekvaliteedi olulist hälvet aastas, millest 92...98% olid pingelohud. Pingelohkude põhjusteks olid äike, õnnetused, seadmete avariid ning tõrked ülekandevõrgus. Pingelohkused esines oluliselt sagedamini kui pingemuhkused. Enamasti oli pingelohu kestus 1...100 perioodi.

### **Pingelohkude vähendamise võimalused**

Pingelohkude kui kõige sagedamini esinevate häiringute vähendamine on sageli ettevõtte elektrisüsteemi 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 on järgmised võimalused – täht/kolmnurk käivitus, sujuvkäivitus, sagedusmuunduriga käivitus või käivitusreostaadiga varustatud faasirootoriga mootor (suurtel võimsustel).
- Ferroresonantstrafo ehk püsiva pinge trafo (*constant voltage transformer*) 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*) lülitub hetkeliselt (~10 ms) ühelt toitefiidril teisele, kui on probleem pinge pidevusega. Vajalik on varufiidri olemasolu.



- Trafo staatiline astmeregulaator (*static tap changing regulator*) on mitme pingeastmega trafo, mille iga väljavõte on varustatud elektroonse lülitiga ja mis hoiab pinget püsivana. Töökiirus 10 ms. Sügavaid pingelohke 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.

## 4.2 Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse tarbimise sõltuvus pingeniivoost ja selle katseline määramine

### 4.2.1 Aktiiv- ja reaktiivkoormuse staatilised mudelid

Tarbija elektrisüsteemi talitluse optimeerimisel on oluline teada, kuidas pingeniivo mõjutab aktiiv- ja reaktiivvõimsust ning missugune on optimaalne pingeniivo antud elektrisüsteemis. Kuna tarbijate 0,4 kV elektrisüsteemides on pingeniivood üldjuhul erinevad ja samuti on erinevad ka pingeniivo hajumised, siis on koormuse pingesõltuvuse uurimine väga oluline. Aktiivvõimsuse ja reaktiivvõimsuse sõltuvust pingest ja sagedusest püsiolukorras kirjeldavad koormuse staatilised mudelid. Koormuse mudeleid on võimalik välja arendada kas arvesse võttes kõiki üksikuid seadmeid ja seadmegruppe – sel juhul on vaja teada erinevate seadmete osakaalu süsteemis, nende nimivõimsusi ja koormusi, või määrates süsteemi mudeli parameetrid katseliselt terve võrgu kohta, muutes pinget kas trafo astmelülitiga või kondensaatorseadme sisse/välja lülitamisega, [3].

Erinevate elektriseadmete (mootorid, lambid, soojuspumbad, muundurid) katseliselt saadud koormusmudelid on toodud näiteks allikates [37, 101]. Mudelid kirjeldavad aktiiv- ja reaktiivvõimsuse sõltuvust pingest pinge muutmise vahemikus  $\pm 10\%$  nimipingest. Samas on märgitud, et mudelid võivad sõltuvalt seadme tootjast erineda, kusjuures reaktiivvõimsuse mudelid lahknevad enam kui aktiivvõimsuse mudelid. Koormuse staatiliste mudelite uurijad [3, 62, 63] on jõudnud järeldusele, et adekvaatse koormusmudeli puhul ei ületa koormuste arvutamise viga 5%.

Erinevate koormusmudelite uurimisele ja nende parameetrite täpsustamisele on pühendatud tööd [3, 62, 63, 64, 72, 73, 75, 78, 106]. Kõige sagedamini kasutatakse ühte kolmest alltoodud mudelist:

- eksponentsiaalne mudel;
- polünoommudel;
- lineaarne mudel.

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

$$P = P_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^\alpha \quad \text{ja} \quad Q = Q_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^\beta, \quad (4.15)$$

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

Koormust iseloomustavad koefitsiendid  $\alpha$  ja  $\beta$  on pingele suhteliselt väikeses muutumisvahemikus konstantsed, aga iga erinevat tüüpi koormuse jaoks erinevad. Praktikas on oluline määrata koefitsiendid  $\alpha$  ja  $\beta$  terve elektrisüsteemi jaoks. Kirjanduses on toodud koefitsientide  $\alpha$  ja  $\beta$  erinevaid väärtusi. Segakoormuse puhul on näiteks:  $\alpha = 0,4 \dots 0,6$  ja  $\beta = 1,4 \dots 1,6$ . Tabelis 4.3 toodud katseliselt määratud koefitsientide  $\alpha$  ja  $\beta$  väärtusi erinevatele elektriseadme tüüpidele, [37, 75, 106].

Tabel 4.3. Koormust iseloomustavad koefitsiendid koormusmudelil

Elektriseadmed	$\alpha$	$\beta$
Suured koormuskeskused	0,3	2,3
Tootmisettevõtted	0,6	3,5
Asünkroonmootorid	0,5	2,5
Hõõglambid	1,5	0
Luminofoorlambid	1,0	0,4
Muunduriga luminofoorlambid	2,1	3,2
Ventilaatorid	0,1	1,6
Alaldid	2,6	4,0

**Koormuse polünoommudel** kirjeldab koormuse sõltuvust pingest polünoomvõrrandi 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

$$P = P_0 \left( a_0 + a_1 \frac{U}{U_0} + a_2 \left( \frac{U}{U_2} \right)^2 \right), \quad Q = Q_0 \left( b_0 + b_1 \frac{U}{U_0} + b_2 \left( \frac{U}{U_2} \right)^2 \right), \quad (4.16)$$

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 artiklis [3] on kirjeldatud tegelike mõõtetulemuste alusel saadud koormusmodelit põhiliselt kodutarbijate võrgupiirkonnas ja saadud järgmine mudel:

$$P = P_0 \left( 0,5 + 0,5 \frac{U}{U_0} \right), \quad Q = Q_0 \left( 9,5 - 21 \frac{U}{U_0} + 13 \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 \right). \quad (4.17)$$

**Koormuse 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:

$$P = P_0 \left( a_0 + a_1 \frac{U}{U_0} \right), \quad Q = Q_0 \left( b_0 + b_1 \frac{U}{U_0} \right). \quad (4.18)$$

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.

#### **Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse pingesõltuvustegurid koormuse lineaarses mudelis**

Tarbija pingesõltuvuse iseloomustamiseks koormuse lineaarses mudelis saab välja tuua tarbija aktiivvõimsuse ja reaktiivvõimsuse pingesõltuvustegurid  $K_P$  ja  $K_Q$

$$K_P = \frac{\Delta P / P_0}{\Delta U / U_0}, \quad K_Q = \frac{\Delta Q / Q_0}{\Delta U / U_0}. \quad (4.19)$$

On ilmne, et erinevat tüüpi ettevõtetel ja tarbijatel on erinevad pingesõltuvustegurid. Tavaliselt on pingesõltuvustegurid  $K_P = 0,2 \dots 1,5$  ja  $K_Q = 2 \dots 3$ , [64]. Kui arvesse võetakse ka võimsuskadod, mis samuti sõltuvad suhtelisest pingest, siis on koormuse tarbitavat aktiiv- ja reaktiivvõimsust võimalik pingefunktsioonina kirjeldada ka järgmiselt:

$$\begin{cases} \Delta P_{tarb} = P_0 + K_P \delta U P_0 + \Delta P_{kaod}(\delta U) \\ \Delta Q_{tarb} = Q_0 + K_Q \delta U Q_0 + \Delta Q_{kaod}(\delta U) \end{cases}, \quad (4.20)$$

kus suhteline pingemuutus  $\delta U = \Delta U / U_0$ .

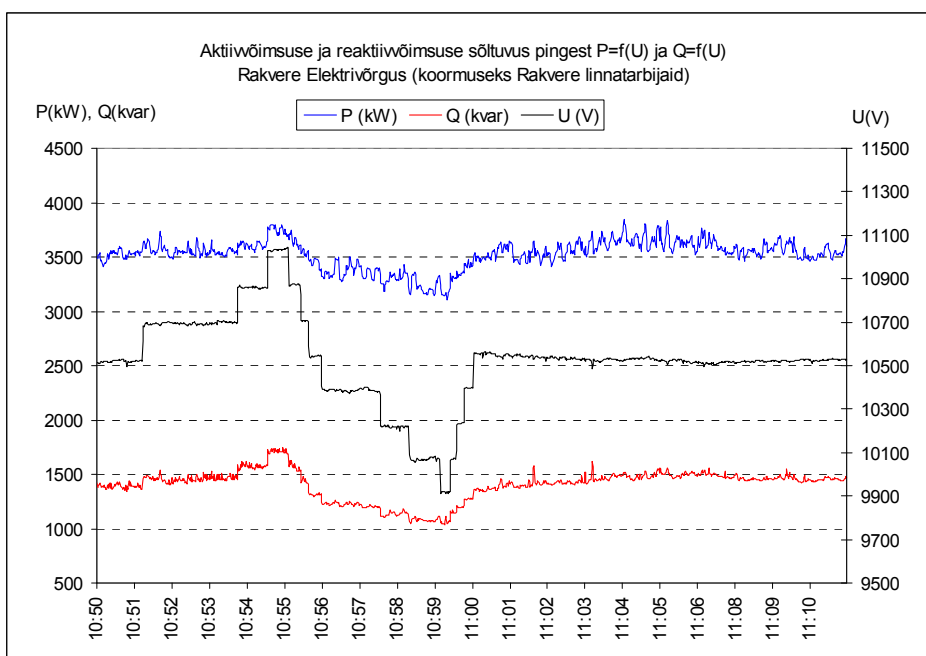
Mudeli (4.20) kohandamisel konkreetse ettevõtte elektrisüsteemi jaoks on küsimus selles, kuidas määrata võimsuse pingesõltuvustegurid  $K_P$  ja  $K_Q$  ning kuidas arvutada kadude sõltuvust pingest.

#### **4.2.2 Aktiivvõimsuse ja reaktiivvõimsuse pingesõltuvuse määramise katseline meetodika**

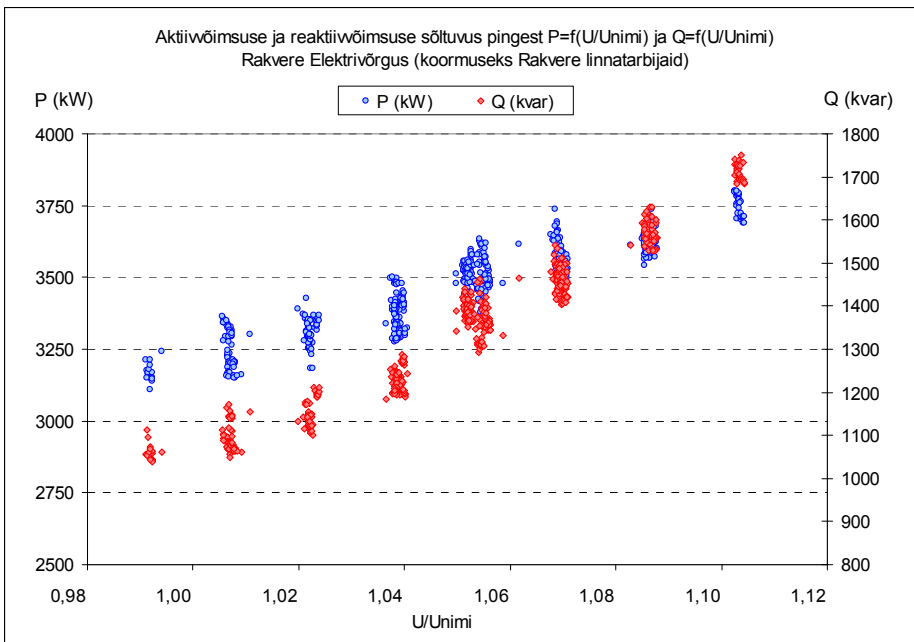
Käesolevas töös on uuritud kahte tüüpi koormuste – asünkroonmootori ja segakoormuse – pingesõltuvustegurite määramise katselisi võimalusi. Töötleva tööstuse ettevõtetes on asünkroonmootorite osakaal kõigist elektriseadmetest sageli 60...80%. Muudel juhtudel võib ettevõtete koormust lugeda segakoormuseks.

Katsete eesmärgiks oli uurida, kuidas registreerivate mõõtmistega kindlaks määrata reaalse koormuse pingesõltuvustegurid. Staatiliste karakteristikute määramiseks on tehtud reaalsete koormustega järgmised katsed. Esimeses katses oli koormuseks linnatüüpi segakoormus, kus koormuseks oli ca pool Rakvere linna tarbijatest, ja teises katses Kunda tsemenditehase tsemendiveski ajami asünkroonmootor nimi-võimsusega 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 arvutis sünkroonselt registreeritud aktiiv- ja reaktiivvõimsuse ja pingete ühe sekundi keskvaartused. Mõõtmisteks on kasutatud elektroonseid arvesteid firmalt EMH-Elgama, tüüp LZQM täpsusklassiga 0,5 aktiivenergiele ja 1,0 reaktiivenergiele. Katsete tulemused on esitatud järgmiselt.

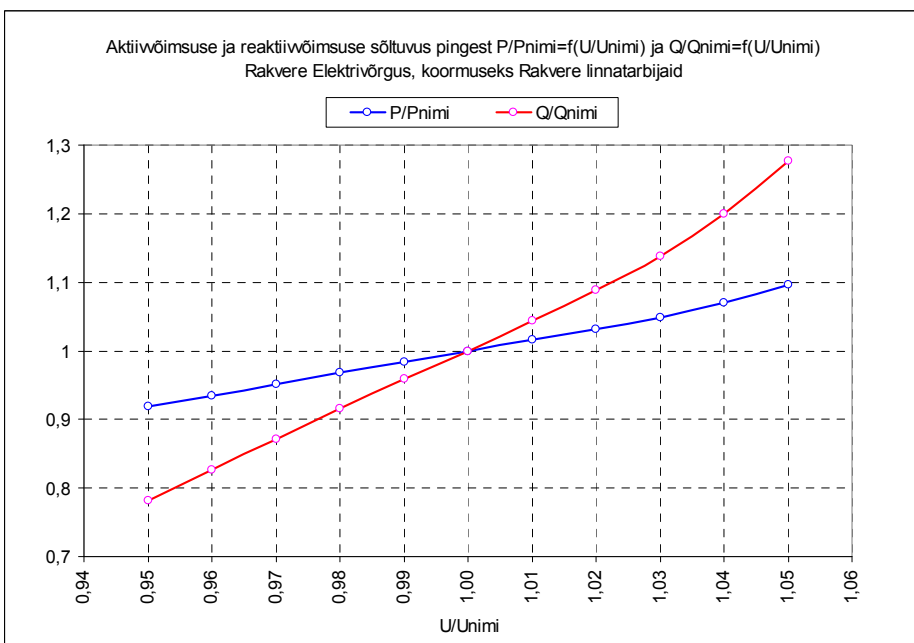
Joonisel 4.4 on toodud aktiiv- ja reaktiivvõimsuse pingesõltuvustegurite määramise katse mõõtetulemused ajas ca 20 min vältel, kus on sünkroonselt registreeritud 1 s keskmised võimsused ja pinged. Pinges on näha astmelised muutused vastavalt trafo väljavõtete ümberlülitustele, samal ajal muutuvad ka võimsused. Iga mõõtepunkt on ajas graafiliselt esitatav, nagu on näidatud joonisel 4.5. Katse tulemusena saab välja tuua võimsuste suhtelised muutused sõltuvalt pinge suhtelisest muutusest, nagu on näidatud joonistel 4.6, 4.7 ja 4.8.



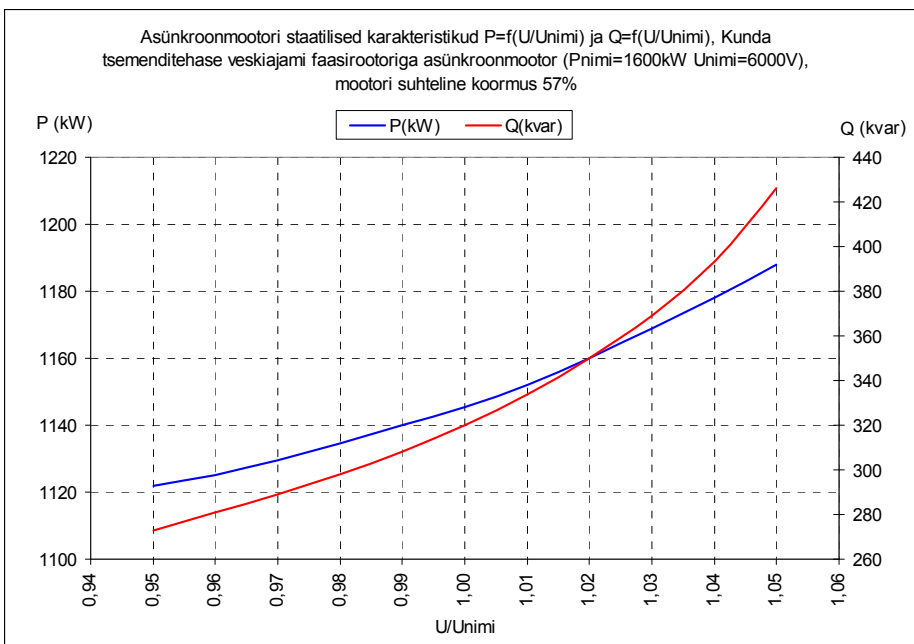
Joonis 4.4. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse pingesõltuvustegurite määramise katse mõõtetulemused ajas, graafikudel on 1 s keskmised võimsused ja pinge



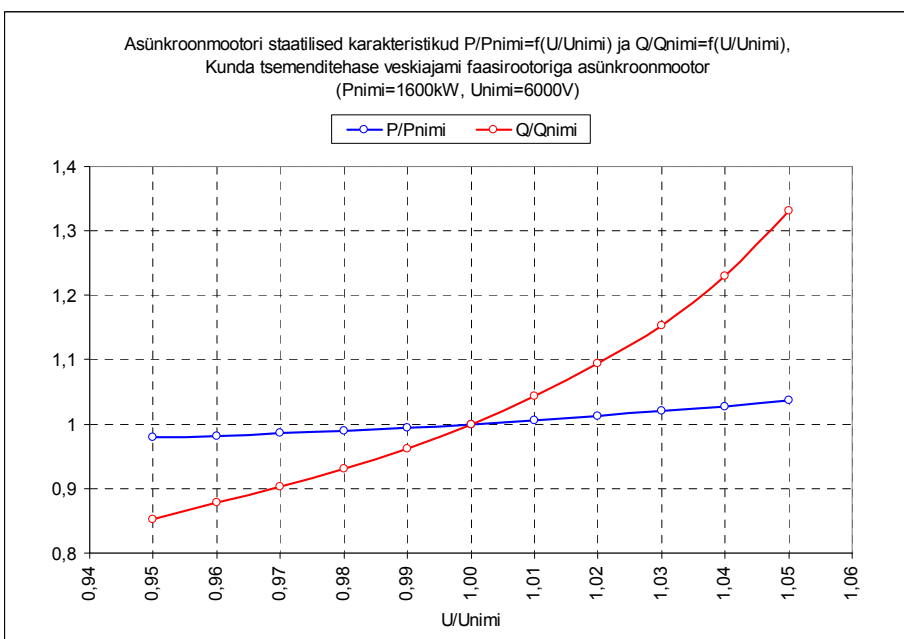
Joonis 4.5. Segakoormuse aktiiv- ja reaktiivõimsuse pingesõltuvuse määramise katse mõõtetulemused suhtelise pingel teljel



Joonis 4.6. Segakoormuse suhtelise aktiiv- ja reaktiivõimsuse pingesõltuvus suhtelise pingel teljel



Joonis 4.7. Asünkroonmootori aktiiv- ja reaktiivvõimsuse absoluutväärtuste pingesõltuvus suhtelise pingel teljel



Joonis 4.8. Asünkroonmootori suhtelise aktiiv- ja reaktiivvõimsuse pingesõltuvus suhtelise pingel teljel

Katsetulemused näitavad järgmist:

- aktiivvõimsuse sõltuvus pingest on lähedane lineaarsele, väikese tõusutrendiga pingetel üle  $1,03U_{nimi}$ ;
- reaktiivvõimsuse sõltuvus pingest on tunduvalt suurem kui aktiivvõimsusel, reaktiivvõimsuse tõus suureneb tunduvalt, kui pinge on üle  $1,03U_{nimi}$ ;
- segakoormuse reaktiivvõimsus on lähedane lineaarsele, asünkroonmootori reaktiivvõimsus kasvab pinge tõustes üle nimipinge tunduvalt kiiremini;
- katsetest arvatud pingesõltuvustegurid lineaarses mudelis on segakoormusel  $K_P=1,8$  ja  $K_Q=4,4$  ning asünkroonmootoril  $K_P=0,5$  ja  $K_Q=5$ .

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

Saadud mõõtetulemusi on võrreldud teiste uurijate poolt saadud tulemustega, näiteks asünkroonmootori mõõtetulemusi USA autorite poolt saadud asünkroonmootori staatiliste karakteristikutega artiklis [34] ja segakoormuse staatiliste karakteristikutega artiklis [62]. Katsetulemuste kokkulangevus uurimistulemustega ülalviidatud artiklites on hea.

Tuleb märkida, et seos tarbitud energia ja pinge vahel ei ole ilmselt nii tugev kui see on võimsuse puhul. Põhjuseks on asjaolu, et hulk tarbijaid – kütteseadmed, pliidad, boilerid jms – vajavad teatud kindlat energiahulka ettenähtud funktsiooni täitmiseks. Kui võimsus on väiksem, toimub protsess kauem ja tarbitud energia kogus jääb ikkagi ligikaudu samaks. Kahjuks ei saa sellist katset reaalses tingimustes korraldada, kuna tarbimine on ajas juhuslik ja üldjuhul kahte täpselt võrreldavat tarbimise ajavahemikku pole.

Ülalkirjeldatud katseline meetodika on väga hõlpsasti läbiviidav, selleks pole isegi ühtegi mõõteseadet vaja. Praegu on peaaegu kõigi tööstustarbijate (äritarbijate) liitumispunktis olemas elektroonsed arvestid, mis vajaliku tarkvara olemasolul võimaldavad saada võimsuste ja pingete ühe sekundi keskvärtused ja need arvutis salvestada. Sel juhul piisab, kui ühendada arvestiga sülearvuti ja paluda võrgu dispetšeril muuta võrgus pinget trafo astmelüliti lülitustega. Katset saab korrata mitu korda ja ettevõtte võimsuste pingesõltuvus ongi olemas. Katse saab läbi viia kahes variandis, koos kondensaatorseadmega ja ilma selleta. See annab süsteemi tarbimise kohta lisainfot.

#### **4.2.3 Asünkroonmootori toitepinge, momendi, pöörlemissageduse ning kasuteguri vahelised seosed**

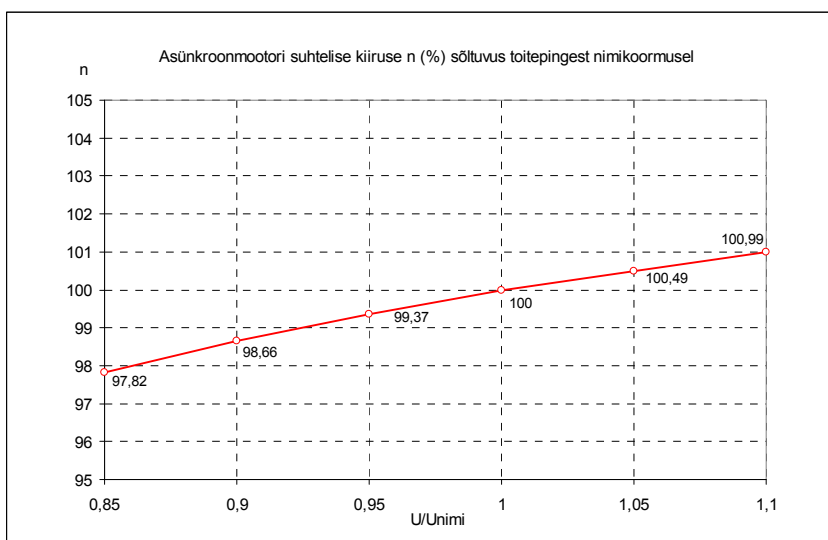
Optimaalse pingeniivo valiku juures on oluline teada, kuidas mõjutab pingeniivo asünkroonmootori kasulikku võimsust ja kuidas sõltub mootori kasutegur toitepingest erinevatel koormustel. Püsiolukorras mootori poolt arendatav moment  $T_m$  võrdub takistusmomendiga  $T_{tak}$  mootori võllil, kusjuures asünkroonmootori moment on võrdeline pinge ruuduga:  $T \cong f(U^2)$ . Seega, kui takistusmoment ei muutu, siis

sõltub kasulik töö ainult mootori pöörlemissagedusest. Mootori poolt arendatav kasulik võimsus on võrdeline momendi ja pöörlemissagedusega:

$$P_{kasulik} = T_m \omega_m . \quad (4.21)$$

Asünkroonmootori pöörlemissageduse ja pinge vahelise seose iseloomustamiseks on arvatud mootori pöörlemissagedus erinevatel pingetel vastavalt avaldisele [106] ja esitatud graafiliselt joonisel 4.9. Mootori parameetrid arvutustes olid järgmised:  $P_{nimi} = 55$  kW;  $n_0 = 1500$  p/min;  $n_{nimi} = 1420$  p/min;  $\Delta P_{ij} = 2,3$  kW;  $\Delta P_{nimi} = 3,2$  kW;  $\Delta Q_{ij} = 21$  kvar;  $Q_{nimi} = 31$  kvar. Selgub, et selliste parameetritega mootoril sõltub pöörlemissagedus pingest väga vähe – pinge alanemisel 5% võrra väheneb pöörlemissagedus ainult 0,6%.

Järelikult on asünkroonmootorite talitus optimaalne kas nimipingel, kui mootor töötab nimikoormusel, või nimipingest veidi väiksemal pingel, kui mootor töötab alakoormusel. Kuna reaalselt ei ole võimalik iga mootori pinget eraldi reguleerida, siis tuleb optimaalne pingeniivo valida igal konkreetsetel tarbijal eraldi sõltuvalt elektriseadmete koormusest.

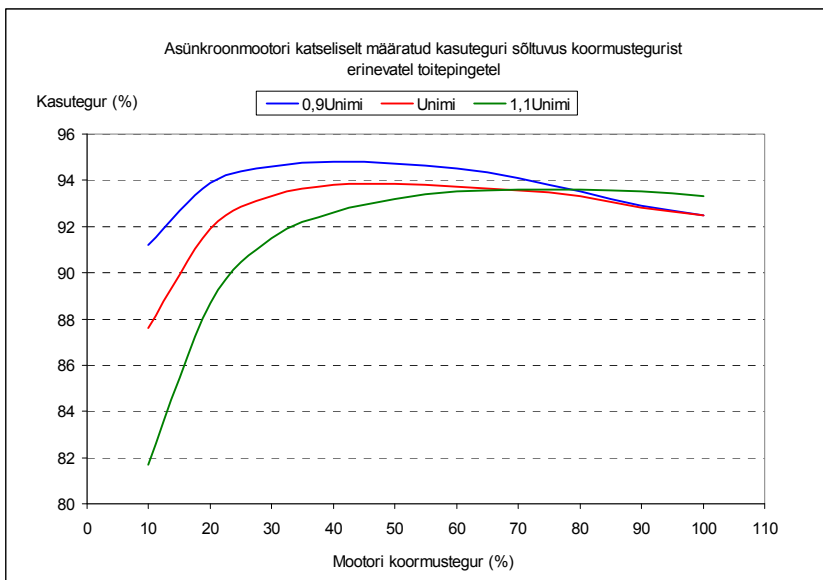


Joonis 4.9. Asünkroonmootori suhtelise pöörlemiskiiruse  $n$  (%) sõltuvus toitepingest

Asünkroonmootori kasuteguri sõltuvust toitepingest erinevatel koormustel on katseliselt uuritud, [97]. Uurimisel katsetati mootorit ASEA MBM 280S nimi-parameetritega 75 kW 3000 p/min ja saadi järgmised tulemused. Mootori suhtelisel koormusel 10% kuni 80% on kasutegur parem, kui pinge on nimipingest kuni 10% madalam. Koormusel 80% kuni 100% on kasutegur parem, kui pinge on nimipingega võrdne või ületab seda kuni 10%, vt joonis 4.10.

Järelikult, arvestades olukorda, et praktikas on mootorite koormus enamasti alla 80% on kaod mootorites väiksemad, kui toitepinge on nimipingest veidi madalam või sellega võrdne, kuid mitte sellest kõrgem.





Joonis 4.10. Asünkroonmootori mõõdetud kasuteguri sõltuvus mootori koormustegurist erinevatel toitepingetel, [97]

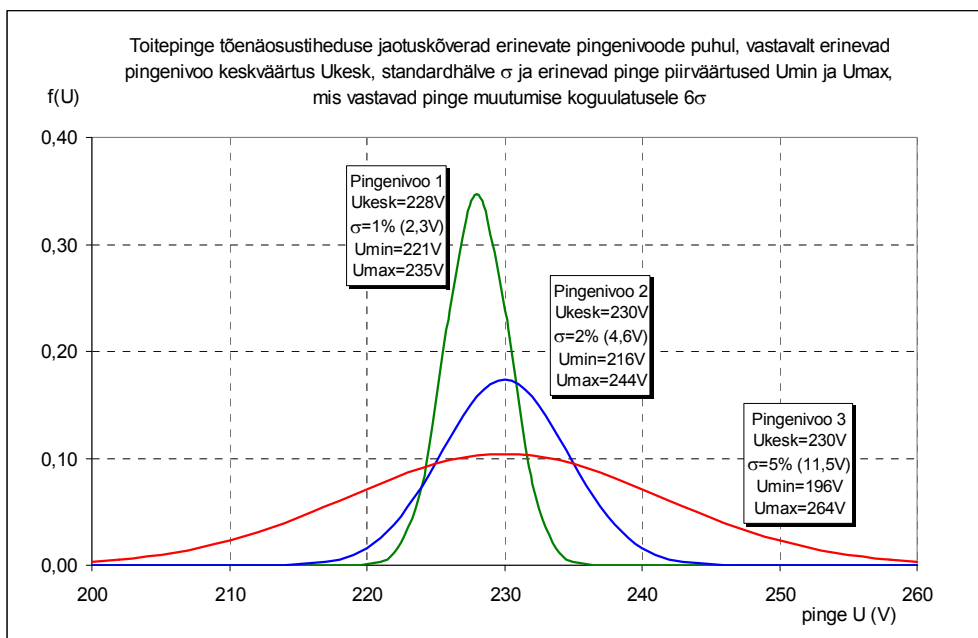
#### 4.2.4 Optimaalse pingeniivo valik ettevõtte elektrisüsteemis

Toitepinge kvaliteedi parameetritest on toitepinge suurus kõige olulisem ja esmapilgul kõige arusaadavam mõiste. Reaalsetes tingimustes pole optimaalse pinge määramine siiski nii lihtne, kuna pinge muutub ajas pidevalt. Standardiga sätestatud pingeniivo vahemik, kus pinge kõrvalekalle võib olla kuni  $\pm 10\%$  nimipingest ehk faasipingel 207...253 V, sobib küll piirulukordade iseloomustamiseks, kuid ei sobi iseloomustamiseks pingeniivo keskväärtust ja hajuvust elektrisüsteemi püsitalitluses.

Pingeniivood iseloomustab pinge jaotuskõver, mis graafiliselt kujutab ülevaatlilikult kahte pingeniivo põhiparameetrit – pingeniivo keskmist väärtust ja pingeniivo hajumist. Praktikas on antud töö käigus saadud mõõtetulemuste alusel pingeniivo keskmine väärtus ettevõtetes tavaliselt vahemikus 220...240 V ja pingeniivo muutumise vahemik piiride 205...265 V. Seega muutub pinge pidevalt teatavas vahemikus minimaalsete ja maksimaalsete väärtuste vahel. Mida väiksem on võrgu näivtakistus ja koormuse muutumise ulatus, seda kitsam on pinge jaotuskõver. Optimaalne pingeniivo võiks olla valitud nii, et pinge jääks etteantud soovitatavasse vahemikku, kus aktiiv- ja reaktiivvõimsuse tarbimine on minimaalne ja pinge muutumise ulatus niisugune, mis ei põhjusta tõrkeid seadmete töös.

Milline on optimaalne pingeniivo ja selle muutumise piirid? On ilmne, et elektriseadmete nimipinge on see, mille juures on tagatud nende nimiparameetrid – võimsus ja kasutegur. Pingetel üle nimipinge suureneb energiatarbimine ja väheneb seadmete tööiga. Seega optimaalseks võiks lugeda sellist pingeniivood, kus keskmine pingeniivo on nimipingest veidi madalam, aga oluliselt väiksema hajuvusega, kui standardi kohaselt lubatud. Pinge ülemised väärtused võiksid ulatuda kuni 2% üle

nimipinge, seega kuni 235 voldini. Pinge alumised väärtused võiksid olla kuni 4% madalamad kui nimipinge, seega kuni 221 V. Sel juhul on optimaalse pingeniivo keskvärtus 228 V ja standardhälve 1% ning vastavalt normaaljaotusele jääb pinge 95,4% tõenäosusega vahemikku 223...233 V ja 99,7% tõenäosusega vahemikku 221...235 V, nagu näidatud joonisel 4.11 pingeniivo 1. Võrdluseks on näidatud ka kaks korda suurema hajuvusega pingeniivo 2 ja standardkohane pingeniivo 3.



Joonis 4.11. Toitepinge tõenäosustiheduse jaotuskõverad erineva pingeniivo puhul

Optimaalse pinge nimipinge 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 20...30%. Seega on nende asünkroonmootorite optimaalne tööpunkt pingel, mis ongi nimipingest väiksem. Teiseks põhjenduseks on, et praegu on tööstusettevõtetes kasutusel veel suur hulk seadmeid, mille nimipinge on 220/380 V. Niisuguse nimipingega seadmete hulka on raske hinnata, aga vägagi tõenäoliselt on see ca 50% kõigist seadmetest. Kuna praktikas pole võimalik grupeerida erineva nimipingega seadmeid, et toita neid erinevatest trafodest, siis tuleb igal ettevõttel mõõtmiste ja analüüsi teel määrata optimaalne pinge, selle muutumisvahemik ja püüda trafo võimsuse ning toiteahela valiku, trafo astmelüliti asendi, koormusgraafiku silumise ja reaktiivvõimsuse kompensatsiooniga saavutada optimaalne pingeniivo ja selle jaotuskõver. See on ülesanne, mis huvitab eelkõige ettevõtet kui tarbijat. Jaotusvõrgu ettevõtte pole motiveeritud selliseid uuringuid tegema ja reeglina reageerib ainult juhul, kui tarbijal on pretensioone liiga madala pinge või sagedaste toitekatkestuste tõttu.

### 4.3 Harmoonilised lisakaod 0,4 kV elektrisüsteemides ning nende arvutuslik ja katseline määramine

#### 4.3.1 Harmoonilised lisakaod 0,4 kV elektrisüsteemides

Ettevõtte ehk äritarnija jaoks on oluline teada, kui suured on harmoonilistest vooludest ja pingetest põhjustatud lisakaod 0,4 kV elektrisüsteemis. Nende lisakadude määramisele on pühendatud rida uurimusi, mille tulemused on avaldatud töodes [4, 9, 12, 13, 14, 16, 30, 47, 48, 79, 105, 109]. Uurimused ja katsed näitavad, et harmoonilised lisakaod näiteks büroohoonetes võivad olla kuni 8%, [55, 56, 79]. Need kaod on põhjustatud harmoonilistest vooludest kaablites ja trafodes, kus nad eralduvad soojusena. Katsed näitavad, et harmooniliste moonutuste vähendamisega võib büroohoonetes saavutada energiasäästu keskmiselt 2,5%.

Probleemiks on, kuidas määrata harmoonilistest vooludest ja pingetest põhjustatud lisakadusid ettevõtte 0,4 kV elektrisüsteemis, mis sisaldab suurt hulka erinevaid seadmeid – mootoreid, valgusteid, muundureid, trafosid, kaableid, kondensaatoreid jm. Lisakadude arvutamine iga elektriseadme kohta eraldi oleks ebareaalne. Otseselt saaks lisakadusid mõõta näiteks sel juhul, kui oleks võimalik näiteks sama koormusega elektrisüsteemi toita vahelduvalt siinuselise pingega ja moonutatud pingega. Kahjuks on selline katse suurema võimsusega 0,4 kV elektrisüsteemi jaoks raskesti teostatav.

Harmooniliste lisakadude praktiliseks arvutamiseks lähtudes harmoonilistest pingetest elektrisüsteemis, mida saab ka reaalselt mõõta, on toodud empiirilised avaldised, mille üldkuju on järgmine, [22, 105, 106, 108]:

$$\Delta P_h = KP_{kogu} \sum_{h=2}^{\infty} \frac{1}{h} \left( \frac{U_h}{U_1} \right)^2. \quad (4.22)$$

Probleem on aga selles, kuidas määrata teguri  $K$  väärtus. Ja kuna harmooniliste spekter muutub ajas, siis on küsimus, kas pika ajavahemiku lõikes on põhjust arvestada üksikuid pinge- või vooluharmoonilisi eraldi või võib lähtuda pinge või voolu moonutustest järgmisel kujul:

$$\frac{\Delta P_h}{P_{kogu}} = f(THD_u; THD_i). \quad (4.23)$$

Seega on ettevõtetal vaja harmooniliste lisakadude määramiseks lihtsat meetodikat, mis kirjeldaks lisakadusid sõltuvalt pinge või voolu harmoonilistest moonutustest.

#### 4.3.2 Harmooniliste lisakadude arvutamine elektrisüsteemis – trafodes, mootorites, kondensaatorites ja liinides

Harmooniliste lisakadude praktiliseks arvutamiseks elektrisüsteemi üksikutes seadmetes – trafodes, mootorites, kondensaatorites ja kaablites – on olemas erinevad arvutusmeetodikad [30, 46, 48].

Vastavalt meetodikale [48] arvutatakse trafo kaod  $\Delta P_T$  järgmise avaldisega:

$$\Delta P_T = 3 \sum_{h=1}^{\max} (I_h)^2 R_{Th} + \Delta P_{Fe,1} \sum_{h=1}^{\max} \left( \frac{U_h}{U_1} \right)^{m_T} \frac{1}{h^{2.6}}, \quad (4.24)$$

kus  $I_h$  – vooluharmoniline järguga  $h$ ;  
 $R_{Th}$  – trafo ekvivalentne aktiivtakistus harmoonilisel sagedusel järguga  $h$ ;  
 $U_h$  – pingeharmoniline järguga  $h$ ;  
 $P_{Fe,1}$  – trafo rauaskaod põhisagedusel;  
 $m_T$  – arvuline tegur.

Kaod mootorites  $\Delta P_M$  arvutatakse avaldisega:

$$\Delta P_M = 3 \sum_{h=1}^{\max} \left( \frac{U_h}{Z_{Mh}} \right) R_{M,h} + \Delta P_{Fe,1} \sum_{h=1}^{\max} \left( \frac{U_h}{U_1} \right)^{m_M} \frac{1}{h^{0.6}}, \quad (4.25)$$

kus  $Z_{Mh}$  – mootori ekvivalentne näivtakistus harmoonilisel sagedusel  $h$ ;  
 $R_{M,h}$  – mootori ekvivalentne aktiivtakistus harmoonilisel sagedusel  $h$ ;  
 $m_M$  – arvuline tegur.

Kaod kondensaatoris  $\Delta P_C$  arvutatakse avaldisega:

$$\Delta P_C = 3 \omega C \sum_{h=1}^{\max} (U_h)^2 \tan \delta_h, \quad (4.26)$$

kus  $C$  – kondensaatori mahtuvus;  
 $\tan \delta_h$  – kaotegur harmoonilisel sagedusel  $h$ .

Kaod kolmejuhilistes kaablites  $\Delta P_L$  (oomilised ja dielektrilised) arvutatakse avaldisega:

$$\Delta P_L = 3 \sum_{h=1}^{\max} (I_h)^2 R_h + 3 \omega h \tan \delta_h (U_h)^2, \quad (4.27)$$

kus  $R_h$  – kaablisoone aktiivtakistus harmoonilisel sagedusel  $h$ ;  
 $\tan \delta_h$  – kaotegur harmoonilisel sagedusel  $h$ .

Harmoonilised lisakaod mootorites pole sugugi tühiselt väikesed. Seepärast on soovitatud, et pinge moonutused  $THD_u$  mootori klemmidel ei ületaks 5%, [22, 30]. Harmooniliste lisakadude määramiseks on kasutusele võetud mõiste – kaalutud harmooniliste tegur (*weighted harmonic factor*), [30]. See on parameeter, mis seob antud elektriseadme klemmidel oleva toitepinge harmooniliste moonutuste ulatuse ja spektri antud seadme harmooniliste lisakadudega. Pinge kaalutud harmooniliste tegur  $K_{hw}$  on üldkujul järgmine:

$$K_{hw} = \sum_{h=2}^{\infty} \frac{1}{h^k} \left( \frac{U_h}{U_1} \right)^l. \quad (4.28)$$

Astendajad  $k$  ja  $l$  on määratud mõõdetulemustest. Näiteks kolmefaasilistel asünkroonmootoritel  $k = 0,95$  ja  $l = 1,6$  ning üldiselt mootoritel  $k = 1$  ja  $l = 2$  ja trafodel

$k = 0,9$  ja  $l = 1,75$ , [30, lk. 238]. Harmooniliste lisakadude arvutamiseks on samas allikas toodud järgmine seos [30, lk. 233]:

$$\frac{\Delta P_{kogu}}{\Delta P_1} = K_2 \sum_{h=2}^{\infty} \frac{1}{h^k} \left( \frac{U_h}{U_1} \right)^l, \quad (4.29)$$

kus  $\Delta P_1$  – kaod nimipingel ja nimikoormusel põhisagedusel;

$K_2$  – tegur, mis sõltub süsteemi seadmetest.

Probleem on selles, kuidas määrata avaldises (4.35) olev tegur  $K_2$ , mis sõltub süsteemi lülitatud seadmetest, ning kuidas määrata kaod põhisagedusel. Harmooniliste lisakadude ja pinge harmooniliste moonutuste vahel saab eeldada võrdelist seost, kuna tavaliselt on harmoonilised lisakaod palju väiksemad kadudest põhisagedusel.

Samas allikas, [30, lk 242] on märgitud, et mootorite puhul on suurimaks lubatavaks kaalutud harmooniliste teguriks  $K_{hw} = 5,8$ . Sellise kaalutud harmooniliste teguri annab näiteks järgmine harmooniliste pingete spekter –  $U_{h3} = 2\%$ ,  $U_{h5} = 5\%$ ,  $U_{h7} = 3,5\%$ ,  $U_{h11} = 1,5\%$ ,  $U_{h13} = 1\%$ ,  $U_{h17} = 0,5\%$  ja  $U_{h19} = 0,5\%$ . Allikas on märgitud, et sel juhul on harmoonilised lisakaod ühefaasiliste mootorite puhul 6,2%, kolmefaasiliste mootorite puhul 3,2% ja trafodes 0,85%. Samuti väheneb sel juhul mootorite tööiga, ühefaasiliste mootorite tööiga väheneb 31,5%, kolmefaasiliste mootorite oma 18% ja trafodel 5%.

Praktikas võib harmooniliste tase 0,4 kV elektrisüsteemides olla oluliselt kõrgem. Nii näiteks on mõnede tööstusettevõtete kaalutud harmooniliste tegur  $K_{hw}$  vahemikus 15...20. See tähendab, et ka harmoonilised lisakaod on näiteks kolmefaasilistes mootorites ca 3 korda suuremad ehk 9,6% kadudest põhisagedusel.

### 4.3.3 Harmooniliste lisakadude määramise katseline meetodika 0,4 kV elektrisüsteemis

Autorile teadaolevalt puudub ettevõtetel praktiliselt kasutatav ja piisavalt lihtne meetodika harmooniliste lisakadude arvutuslikuks või katseliseks määramiseks 0,4 kV elektrisüsteemides tervikuna. Seepärast on antud töös esitatud järgmine meetodika, kus katseliselt määratakse harmooniliste lisakadude sõltuvus pinge harmoonilistest moonutustest  $THD_u$ . Katse seisneb selles, et juhul kui uuritavas elektrisüsteemis on olemas kondensaatorseade, on võimalik ettevõtte töö ajal kondensaatorite sisse- ja väljalülitamisega harmooniliste moonutuste taset antud elektrisüsteemis muuta. Juhul, kui kondensaatorseadet ei ole, aga on üks suure võimsusega ebalineaarne seade, siis saab katseid teha sellise seadme sisse/välja lülitamisega. Sellised lülitused ettevõtte tööd ei sega, kuid lülituste hetkel muutuvad elektrisüsteemi kõik põhilised parameetrid – aktiiv- ja reaktiivvõimsus, pinged, ja voolud, võimsustegur ning pinge ja voolu harmoonilised moonutused. Registreerides need parameetrid sünkroonselt ning eeldusel, et ettevõtte seadmete koormus väga lühikese ajavahemiku (sekundite) jooksul ei muutu võib eeldada, et aktiivvõimsuse muutus lülituse hetkel on põhjustatud kolmest põhilisest tegurist – pingemuutusest

$\Delta U$ , aktiivvõimsuskadudest kondensaatorseadmes ja harmooniliste lisakadude muutusest lülituse hetkel. Summaarne aktiivvõimsuse muutus on:

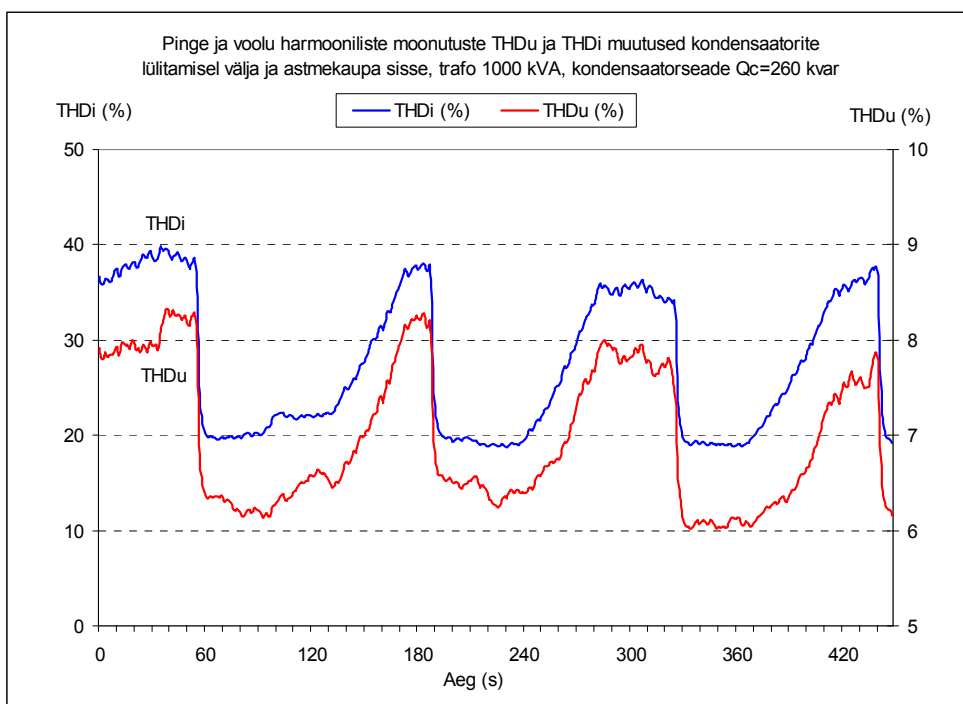
$$\Delta P_{kogu} = \Delta P_{\Delta U} + \Delta P_C + \Delta P_h, \quad (4.30)$$

kus  $\Delta P_{\Delta U}$  – aktiivvõimsuse muutus pingemuutusest,

$\Delta P_C$  – aktiivvõimsuskadod kondensaatorseadmes,

$\Delta P_h$  – aktiivvõimsuse muutus harmooniliste lisakadude muutusest.

Pinge ja voolu harmooniliste moonutuste muutumise ulatust tööstusettevõttes kondensaatorite välja- ja sisselülitamisel on näidatud joonisel 4.12.



Joonis 4.12. Voolu ja pinge harmooniliste moonutuste muutumise ulatus kondensaatorite korduval väljalülitamisel ja seejärel astmekaupa sisselülitamisel

Harmooniliste lisakadude katseliseks määramiseks ühendatakse ettevõtte 0,4 kV elektrisüsteemi sisendisse (liitumispunkti) elektrikvaliteedi analüsaator ja registreeritakse samaaegselt järgmised parameetrid:

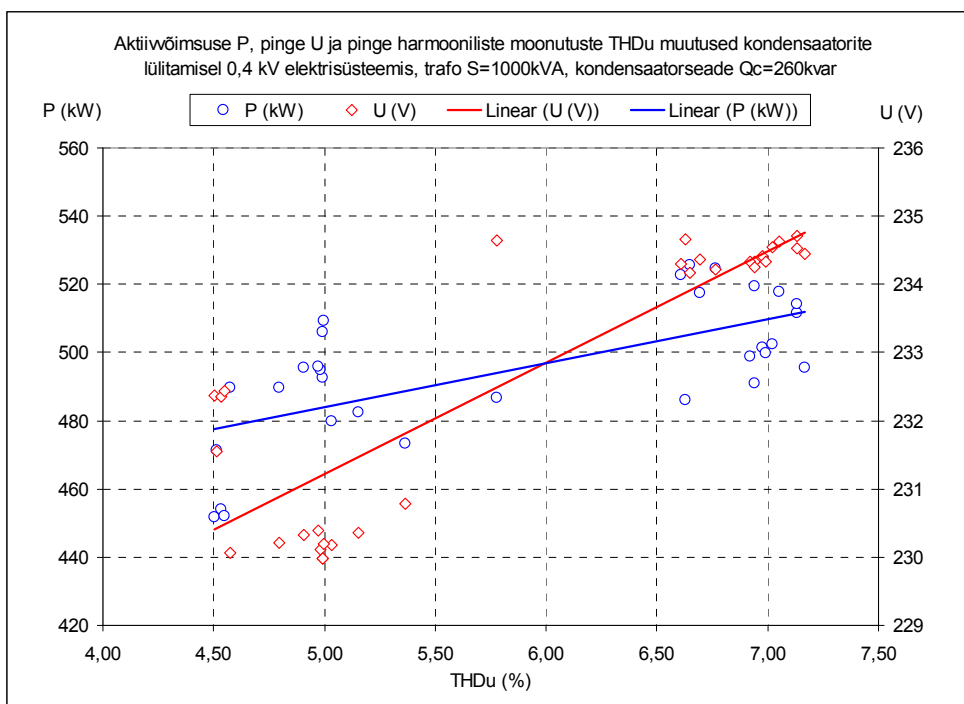
- summaarne aktiivvõimsus  $P_{kogu}$  (kW);
- toitepinged (faasipinged)  $U_{L1}$ ,  $U_{L2}$  ja  $U_{L3}$ ;
- toitepinge harmoonilised moonutused  $THD_u$  ja harmoonilised pinged  $U_h$ .

Katse käigus lülitatakse kondensaatorseadet sisse ja välja korduvalt. Eeldusel, et ettevõtte kasulik aktiivvõimsus väga lühikese ajavahemiku (sekundite) vältel ei muutu, saame katsetulemustest välja arvutada aktiivvõimsuse sõltuvuse pinge

harmoonilistest moonutustest  $\Delta P_h = f(THD_u)$ . Kuna kondensaatorite lülitamisega muutub ka pingeniivo, siis tuleb pingeniivo muutusest tingitud aktiivvõimsuse muutus katsetulemustest elimineerida. Samuti tuleb arvesse võtta aktiivvõimsuskao kondensaatorseadmes.

Vastavad katsed ja analüüs on läbi viidud ettevõttes AS Keila Kaabel ettevõtte seadmete täiskoormuse tingimustes. Võimsuste, pingete ja harmooniliste moonutuste sünkroonseks mõõtmiseks on kasutatud kahte elektrikvaliteedi analüsaatorit FLUKE 434. Katsete ja mõõtmiste käigus on pinge harmoonilistes moonutustes võimalikult suure muutuse tekitamiseks lülitatud sisse/välja kogu kondensaatorseadet koguvõimsusega  $Q_C = 260$  kvar.

Kondensaatorseadme lülituste käigus muutuvad süsteemi mitmed parameetrid. Meetodi plussiks on, et katset saab teha mitu korda ja sellega vähendada juhuslike muutuste mõju. Kõige ülevaatlikum on katse tulemused esitada graafiliselt teljestikus aktiivvõimsus – pinge harmoonilised moonutused – pinge suurus. Ühe katse selliselt esitatud tulemused on joonisel 4.13, kus iga punkt tähistab ülaltoodud parameetrite 1 s keskmisi väärtusi. Väiksema harmoonilise moonutusega  $THD_u$  punktid vastavad väljalülitatud kondensaatorseadmele ja vastupidi.



Joonis 4.13. Katsetulemused aktiivvõimsuse muutuse määramiseks sõltuvalt pinge harmooniliste moonutuste muutusest kondensaatorite sisselülitamisel

Läbiviidud katsed näitavad, et antud elektrisüsteemis suurenevad kondensaatorite sisselülitamisega pinge kogumoonutused 4,5 protsendilt kuni 7,0 protsendini. Sama-

aegselt kasvab pinge 230,7 voldini ning tarbitav aktiivvõimsus 482 kilovatilt 509 kilovatini. Aktiivvõimsuse muutus on 27 kW. Eeldusel, et põhjuseks ei ole koormuse muutus, on see võimsuse muutus tingitud pingemuutusest, pingemoonutuste muutusest ja kondensaatorseadme enda võimsuskadudest. Aktiivvõimsuse sõltuvust pingest on võimalik määrata katseliselt, nagu on kirjeldatud punktis 4.2.2. Selliste katsete mõõtetulemused ja senised kogemused [64] näitavad, et keskmine aktiivvõimsuse pingesõltuvustegur tööstusettevõtete elektrisüsteemis on  $K_p = 1$ .

Kondensaatorseadme enda aktiivvõimsuskaod on võrreldes aktiivvõimsuse muutusega suhteliselt väikesed ja nende mõõtmisel on mõõteviga suur. Antud juhul on arvatud tulemusi ja mõõtetulemusi võrreldes saadud nende kadude suuruseks 0,9 kW. Antud elektrisüsteemi katsete mõõtetulemused (keskmised väärtused) kahes talitluses on toodud tabelis 4.5.

Tabel 4.5. Harmooniliste lisakadude muutuse mõõtetulemused tööstusettevõtte 0,4 kV elektrisüsteemis kondensaatorite lülitamisel

Elektrisüsteemi parameeter	Sisselülitatud kondensaatoritega	Väljalülitatud kondensaatoritega
$P_{kogu}$ (kW)	509	482
$Q$ (kvar)	150	327
$TPF$	0,94	0,77
$\cos \varphi_1$	0,98	0,78
$THD_u$ (%)	6,9	4,8
$THD_i$ (%)	26,3	11,2
$U_{kesk}$ (V)	234,3	230,7
$I_L$ (A)	752	834
$P_{kogu}$ (kW)	27	0
$\Delta P_C$ (kW)	0,9	0
$\Delta P_u$ (kW)	7,7	0
$\Delta P_h$ (kW)	18,4	0

Eeldusel, et harmooniliste lisakadude sõltuvus harmooniliste moonutuste tasemest teatavas keskmises muutumisvahemikus on lineaarne saab ülalkirjeldatud katselise meetodiga harmoonilisi lisakadusid elektrisüsteemis ligikaudselt hinnata. Läbiviidud katsetes on uuritud elektrisüsteemis saadud harmooniliste lisakadude muutuse suuruseks  $\Delta P_h = 18,4$  kW ehk 3,8% kogu tarbitavast aktiivvõimsusest. On siiski võimalik, et teatud osa aktiivvõimsuse suurenemisest läheb kasulikuks tööks ja sel juhul ei ole kogu võimsuse muutus seotud kadudega. Kahjuks pole võimalik täpselt hinnata, kui suur osa see on. See vajab edasist uurimist.

Teades harmooniliste lisakadude ligikaudset suurust saab hinnata neile aastas tehtud kulutusi. See omakorda võimaldab analüüsida moonutuste vähendamise abinõude võimalusi ja hinnata erinevate abinõude tasuvust.



#### 4.4 Kokkuvõte ja järeldused

1. Toitepinge kvaliteet mõjutab otseselt ja kaudselt nii võimsuse tarbimist, võimsuskadusid kui ka seadmete töö tõrketust ja tööiga ettevõtete elektrisüsteemides. Seetõttu on toitepinge parameetrite ja nende mõju uurimine elektritarbimisele oluline ja vajalik.
2. Käesolevas peatükis on antud ülevaade pingekvaliteedi erinevate parameetrite, nagu pingeniivo, pingehälbed, pinge harmoonilised moonutused ja pingete asümmeetria, mõjust elektriseadmetele ja võimsuskadudele neis ning on välja toodud põhilised seosed võimsuskadude arvutamiseks sõltuvalt pingeniivoost ja pinge harmoonilistest moonutustest. Põhjalikumalt on iseloomustatud pingeniivo ja pinge harmooniliste moonutuste mõju võimsuskadudele liinides, trafodes, mootorites ja kondensaatorites. Samuti on antud ülevaade sagedamini kasutatavatest koormuse staatilistest mudelitest, mida kasutatakse ettevõttes tarbitava võimsuse pingesõltuvuse iseloomustamiseks.
3. Peatükis on kirjeldatud kahte praktilist katsemeetodit tarbija 0,4 kV elektrisüsteemi uurimiseks. Esimene neist on ette nähtud elektrisüsteemi aktiiv- ja reaktiivvõimsuse pingesõltuvuse ehk koormuse staatilise mudeli parameetrite määramiseks. Teine katsemeetodika on ette nähtud harmooniliste lisakadude kaudseks määramiseks ning samuti kondensaatorseadme mõju määramiseks pingeniivoole, tarbitavale võimsusele ning harmoonilistele moonutustele.
4. Kirjeldatud katsemeetodite peamiseks eelisteks on esmalt see, et katsete läbiviimine ei häiri kuidagi ettevõtte tööd, registreerivaid mõõtmisi on võimalik teha tavalises tööolukorras – selleks ei tule teha toitekatkestusi, ning teiseks see, et katseid võib saadud mõõtetulemustest juhuslike muutuste kõrvaldamiseks teha korduvalt. Pakutud pingesõltuvuse katseline meetod on väga lihtsasti teostatav, selleks pole isegi ühtegi mõõteseadet vaja. Praegu on peaaegu kõigi tööstustarbijate (äritarbijate) liitumispunktides olemas elektroonsed arvestid, mis vajaliku tarkvara olemasolul võimaldavad mõõta aktiiv- ja reaktiivvõimsuste ja pingete 1 s keskvaärtused ning need salvestada. Seega on katseks vaja ainult sülearvuti arvestiga ühendada ja paluda võrgu dispetšeril muuta keskpinge võrgus pinget trafo automaatse astmelüliti ümberlülitustega. Harmooniliste lisakadude määramise katseteks on lisaks vaja harmoonilisi volulusid ja pingeid registreerivat mõõteseadet.
5. Esitatud katsemeetodika võimaldab hinnata ka seda, milline on kondensaatorseadme kasutamise mõju ettevõttele, kas see on majanduslikult ja tehniliselt kasulik või hoopis kahjulik. Ebasoodsas olukorras võib olla ka nii, et kondensaatorseadme kasutamisega väheneb küll reaktiivenergia tarbimine, kuid suureneb aktiivenergia tarbimine, suurenevad aktiivvõimsuskadod elektrisüsteemis, suureneb tõrgete oht ja väheneb seadmete tööiga. Kokkuvõttes võib reaktiivvõimsuse kompensatsiooni ebasobiv tehniline lahendus tuua kasu asemel hoopis kahju, mis ei ole paraku otseselt hinnatav või mõõdetav.

## 5 Reaktiivvõimsuse kompensatsioon kondensaatorseadmetega

### 5.1 Kondensaatorseadmete kasutamise eelised

Reaktiivvõimsuse kompensatsioon kondensaatorseadmetega on üks enamlevinud abinõudest ettevõtete elektrikulude optimeerimisel. Samuti mõjutab kompensatsioon pingekvaliteedi parameetreid. Selle valdkonnaga seotud probleeme on uuritud pikka aega, kuid need on ka praegu aktuaalsed [8, 26, 27, 49, 51, 70, 75, 104, 106]. Kompensatsioon on ettevõtetele kasulik järgmistel tuntud põhjustel.

- Väiksemad reaktiivenergia kulud, mis kajastub otseselt elektriarvetel, reaktiivenergia tarbimise vähenemine on tavaliselt 4...6 kordne võrreldes olukorraga, kus kompensatsioon puudub; kui reaktiivvõimsuse tegur  $\tan\phi$  on väiksem kui 0,15, siis reaktiivenergia kulu puudub.
- Väiksemad pingelangud liinides ja trafodes, mille tõttu toitepinge on stabiilsem, pingeniivoo hajuvus ja pingekõikumiste ulatus väiksem ning pinge kõrgem; suurte reaktiivvõimsuse muutuste puhul on ka pingekõikumised suured, kuna reaktiivvõimsuse muutused mõjutavad pinget rohkem kui aktiivvõimsuse muutused. Põhjuseks on asjaolu, et toiteahela näivtakistus on peamiselt induktiivne. Seega aitavad kondensaatorid vähendada pingekõikumisi ja isegi asünkroonmootorite käivitusel esinevaid lühiajalisi pingelohke.
- Väiksemad kaod, mis tekivad voolu reaktiivkomponendi ülekandmisest liinides ja trafodes; need kaod ehk oomilised kaod on soojuskaod, mis enamasti eralduvad seal, kus pole vaja ja mis tuleb tarbijal kinni maksta; oomilised kaod  $I^2R$  on tööstusettevõtetes sõltuvalt suurima koormusega töötundide arvust ja kaablite ristlõikest vahemikus 2,5% kuni 7,5% tarbitud energiast, [30]. Kadude tase sõltub töötundide arvust ja kaablite ristlõikest.
- Väiksemad voolud trafodes ja liinides, mistõttu väheneb trafode ja liinide koormus ja on võimalik juurde lülitada täiendavaid tarviteid (seadmeid), et olemasolevate trafode ja liinide võimsust paremini ära kasutada.

Reaktiivvõimsuse kompensatsioon ettevõtetes on kasulik ka jaotusvõrgule ja ülekandevõrgule, sest sel juhul ei koormata võrku voolu reaktiivkomponendiga. Võrgu läbilaskevõimsus on reaktiivvõimsuse kompensatsiooni korral suurem, võimsuskaod ja pingekaod aga väiksemad. Ainult elektriijaamade poolt toodetud reaktiivvõimsusega ei ole otstarbekas katta kogu energiasüsteemi vajadusi, sest:

- reaktiivvõimsuse ülekandmine elektrivõrgus on seotud võimsuskadudega;
- igas elektrivõrgu sõlmes eraldivõetuna on soovitav reaktiivvõimsuse tasakaal, reaktiivvõimsus tuleks kompenseerida võimalikult lähedal reaktiivvõimsuse tarbijale, et vähendada kadusid;
- reaktiivvõimsuse tarbimine on seotud jaotusvõrgu pingeniivodega, mis on igas jaotusvõrgu punktis erinevad, kuigi sagedus on süsteemis ühesugune.

## 5.2 Kondensaatorseadmete kasutamise puudused

Lisaks ülaltoodud eelistele kaasneb kondensaatorseadmete kasutamisega ka puudusi, mis ei ole alati nõnda hästi tuntud kui kompensatsiooniga kaasnevad eelised. Teatud juhtudel võivad kaasnevad negatiivsed mõjud ettevõtte elektrisüsteemile kaaluda üles saadavad positiivsed tulemused, kusjuures tagajärjena võivad elektrikulud osutuda isegi suuremaks kui ilma kompensatsioonita olukorras. Olulisemad puudused on järgmised.

- Kõrgenenud pingeniivo – see ilmneb eriti olukorras, kus pingeniivo on nimipinge lähedane või nimipingest suurem ka ilma kompensatsioonita. Kondensaatorite sisselülitamisega tõuseb pinge seda rohkem, mida suurem on kondensaatorite võimsus ja trafo näivtakistus. Tavaliselt on suhteline pingetõus 2...3% pingest. Kõrgenenud pinge, juhul kui seda ei korrigeerita, toob kaasa ka suurema energiatarbimise ja suuremad võimsuskaod, eriti mootorites ja trafodes.
- Kõrgenenud harmooniliste moonutuste tase toitevoolus ja pinges. Kondensaatorite sisselülitamisega tõuseb harmooniliste moonutuste tase nii toitevoolus kui ka pinges. See tõus võib olla mitteoluline, aga võib olla ka arvestatav. Voolu harmoonilised moonutused võivad kondensaatorite sisselülitamisel suureneeda näiteks 10...20 protsendilt 30...60 protsendini ja pinge harmoonilised moonutused 4...5 protsendilt 6...10 protsendini. Kõrgem harmooniliste moonutuste tase põhjustab täiendavaid võimsuskadusid mootorites, trafodes, kaablites ja kondensaatorites. Halvemal juhul võib esineda harmooniliste resonants näiteks 5-nda, 7-nda või 11-nda harmoonilise sagedusel, mille korral kasvavad kordades harmoonilised voolud ja pinged, mis võivad põhjustada elektriseadmete talitluse tõrkeid, riknemist või nende tööea märgatavat lühenemist. Harmooniliste voolude ja pingete ning resonantsitingimuste uurimistulemusi 0,4 kV elektrisüsteemides on kirjeldatud peatükis 6.
- Täiendavad võimsuskaod kondensaatorseadmetes endis, sh kaod nii kondensaatorites, kontaktorites, sularites kui ka juhtmetes, kusjuures kaod suurenevad seda enam, mida kõrgem on pinge ja pinge harmooniliste moonutuste tase. Kuigi need kaod on kaasaegsetel geel- või gaastäitega kondensaatoritel suhteliselt väikesed, ei ole nad ka tähtsusetud, seda eriti filterkondensaatorseadmetes, kus ilma sundventilatsioonita läbi ei saa. Tavaliselt on võimsuskaod vahemikus 1...2 W/kvar ilma filterreaktoriteta kondensaatorseadmetes ja 4...10 W/kvar filterkondensaatorseadmetes. Tegelikud kaod võivad olla ka märksa suuremad sõltuvalt sellest, kui suured on kondensaatorite voolu harmoonilised moonutused.
- Kondensaatorite sisselülitamisel esinevad pinges ja voolus siirdeprotsessid. Need on kiired pinge ja voolu sumbuvad võnkumised sagedusega 300...1000 Hz, mis võivad põhjustada häiringuid. Nende mõju vähendamiseks kasutatakse erinevaid võtteid. Probleem on suurem keskpingel 6...10 kV ja suure võimsusega kondensaatorite lülitamisel madalpingel.

### 5.3 Reaktiivvõimsuse kompensatsiooniga seotud põhimõisted

Vahelduvvoolu elektritarbijad tarbivad üldjuhul võrgust nii aktiivvõimsust kui ka reaktiivvõimsust. Aktiivvõimsus muundatakse mehaaniliseks tööks mootorites, soojuseks kütteseadmetes ja valguseks. Reaktiivvõimsus on vajalik elektri- ja magnetväljade tekitamiseks mootorites, trafodes, kondensaatorites jne.

Tarbija poolt tarbitavat koguvõimsust nimetatakse näivvõimsuseks  $S$ . Näivvõimsus sisaldab kahte komponenti – aktiivvõimsust  $P$  ja reaktiivvõimsust  $Q$ , kusjuures:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} . \quad (5.1)$$

Aktiivvõimsuse  $P$  ja näivvõimsuse  $S$  suhet nimetatakse võimsusteguriks. Võimsustegur ehk lühemalt  $\cos\varphi$  (*displacement power factor – DPF*) iseloomustab nurka põhisagedusliku faasipinge ja faasivoolu vahel ja on arvuliselt võrdne põhisagedusliku aktiivvõimsuse  $P_1$  ja näivvõimsuse  $S_1$  suhtega:

$$\cos\varphi = DPF = \cos\varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} , \quad (5.2)$$

kus  $S_1 = U_1 I_1$  on põhisageduslik näivvõimsus ja  $P_1 = U_1 I_1 \cos\varphi_1$  – põhisageduslik aktiivvõimsus.

Ideaalne väärtus võimsustegurile on üks. Ettevõtete elektrisüsteemid on tavaliselt induktiiv-aktiivtakistusega, kus vool jääb pingest faasis maha (*lagging power factor*). Põhjuseks on induktiivsed koormused, mis vajavad reaktiivenergiat oma magnetahelates magnetväljade tekitamiseks. Näiteks on nimikoormusel või selle lähedastel koormustel töötava asünkroonmootori võimsustegur 0,85...0,93. Juhul, kui sama mootor on tühijooksul, on tema võimsustegur oluliselt madalam, ainult 0,3...0,4. Seega on võimsustegur elektrisüsteemis, kus kasutatakse otselülituses asünkroonmootoreid, peaaegu alati väiksem kui üks.

### 5.4 Võimsused ja võimsustegur harmooniliste moonutuste korral

Pinge ja voolu harmooniliste moonutuste korral avalduvad aktiiv-, reaktiiv- ja näivvõimsus pinge ja voolu harmooniliste komponentide  $U_h$  ja  $I_h$  ja nende vahelise faasinihkenurga  $\varphi_h$  alusel järgmiselt, [30]:

$$P_{kogu} = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \cos\varphi_h , \quad (5.3)$$

$$Q_{kogu} = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \sin\varphi_h , \quad (5.4)$$

$$S_{kogu} = \sqrt{\left( \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \right) \left( \sum_{h=1}^{\infty} U_h^2 \right)} . \quad (5.5)$$

Harmoonilised moonutused muudavad osa kasulikust võimsusest ja energiast kõrgema sagedusega energiaks, mis mitmetes seadmetes ei tee enam kasulikku tööd ja muutub soojuskaoks. Seega väheneb harmooniliste moonutuste puhul ka tegelik

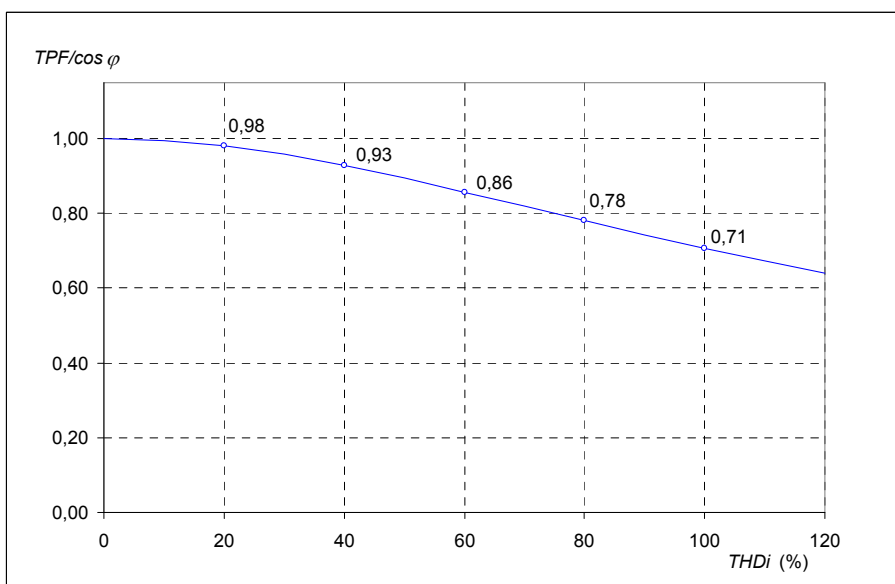
võimsustegur  $\cos\varphi_{teg}$  (*total power factor, true power factor – TPF*), mis väljendub järgmiselt:

$$TPF = \cos\varphi_{teg} = \frac{P_{kogu}}{S_{kogu}}. \quad (5.6)$$

Kuivõrd pinge harmoonilised moonutused on enamasti alla 10%, on nende mõju vähene ja selle võib jätta arvestamata. Sel juhul saame järgmise seose tegeliku võimsusteguri  $TPF$  ja  $\cos\varphi_1$  ehk  $DPF$  vahel:

$$TPF = \cos\varphi_{teg} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \cos\varphi_1. \quad (5.7)$$

Kui elektrisüsteemis esineb voolu ja pinge harmoonilisi moonutusi, on  $DPF$  ehk  $\cos\varphi_1$  alati suurem kui  $\cos\varphi_{teg}$  ehk  $TPF$ . Kui näiteks voolu harmoonilised moonutused  $THD_i$  on 40%, mis on küllaltki tavapärane, siis tegelik võimsustegur  $TPF$  on 0,93, vt joonis 5.1.

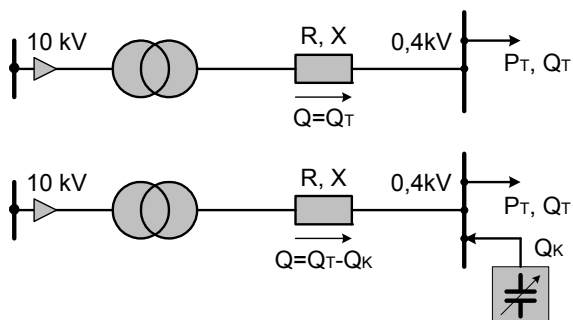


Joonis 5.1. Tegeliku võimsusteguri  $TPF$  ja  $\cos\varphi$  suhe sõltuvalt voolu harmoonilistest moonutustest  $THD_i$

Seega on võimsusteguri alanemisel kaks võimalikku põhjust. Esiteks faasinihkenurk  $\varphi_1$  tarbitava voolu ja toitepinge põhisedusliku harmoonilise vahel. Teiseks põhjuseks on voolukõvera kuju moonutused, mis võetakse arvesse voolu harmooniliste teguriga  $THD_i$ .

## 5.5 Võimsuskad reaktiivvõimsuse ülekandmisel

Reaktiivvõimsuse kompensatsioon ettevõttes ehk paralleelkompensatsioon seisneb kondensaatorseadme ühendamises 0,4 kV elektrisüsteemi. Lihtsustatult võib seda kujutada joonisel 5.2 toodud aseskeemina, kus ülemisel skeemil on olukord ilma kompensatsioonita, alumisel skeemil koos kompensatsiooniga.



Joonis 5.2. Elektrisüsteemi aseskeem võimsuskadude arvutamisel ilma kondensaatorseadmeta ja koos automaatse kondensaatorseadmega

Reaktiivvõimsuse ülekandmine tekitab aktiivvõimsuse kadusid võrgu aktiivtakistustes  $R$  ning reaktiivvõimsuse kadusid reaktiivtakistustes  $X$ . Aktiivvõimsuse kaod avalduvad tuntud seosest:

$$\Delta P = 3I^2 R = 3I_A^2 R + 3I_R^2 R, \quad (5.8)$$

kus  $I_A$  ja  $I_R$  – voolu aktiiv- ja reaktiivkomponent.

Seega koosnevad aktiivvõimsuse kaod kahest komponendist:

$$\Delta P = \Delta P_P + \Delta P_Q = R \frac{P^2}{U^2} + R \frac{Q^2}{U^2}, \quad (5.9)$$

kus  $\Delta P_P$  ja  $\Delta P_Q$  – aktiivvõimsuskad aktiiv- ja reaktiivvõimsuse ülekandmisest.

Kui võrd reaktiivvõimsuse tegur  $\tan \varphi = \frac{Q}{P}$  ja  $\frac{\Delta P_Q}{\Delta P_P} = \tan^2 \varphi$ ,

siis saab aktiivvõimsuse kaod avaldada ka järgmiselt:

$$\Delta P = \Delta P_P (1 + \tan^2 \varphi). \quad (5.10)$$

Tabelis 5.1 on toodud kadude suhe reaktiivvõimsusest ja aktiivvõimsusest põhjustatud kadude vahel erinevate  $\tan \varphi$  väärtuste korral.

Tabel 5.1. Kadude reaktiiv- ja aktiivkomponendi suhe  $\Delta P_Q / \Delta P_P$  erineva  $\tan \varphi$  korral

Tarbija iseloomustus	$\tan \varphi$	$\Delta P_Q / \Delta P_P, \%$
Kompensatsioon puudub	$\tan \varphi = 0,6 \dots 1,2$	36...144
Osaline kompensatsioon	$\tan \varphi = 0,3 \dots 0,6$	9...36
Optimaalne kompensatsioon	$\tan \varphi = 0,1 \dots 0,2$	1...4

Seega näeme, et kui reaktiivvõimsusest tingitud kadude ja aktiivvõimsusest tingitud kadude suhe  $\Delta P_Q/\Delta P_P$  peab olema alla 10%, on vajalik, et  $\tan\varphi$  väärtus ei oleks suurem kui 0,3.

Ülaltoodud seostest võib eraldi välja tuua veel kadude vähenemise teguri  $K_{KM}$ :

$$K_{KM} = \frac{\delta P_P}{\delta Q} = \frac{QR}{U^2}, \quad (5.11)$$

kus  $\delta P_P$  – aktiivvõimsuse kadude suhteline vähenemine;

$\delta Q$  – reaktiivvõimsuse suhteline vähenemine.

Seos (5.11) näitab, et kõige tõhusam on vähendada reaktiivvõimsuse tarbimist seal, kus süsteemi aktiivtakistus on kõige suurem, see on tavaliselt 0,4 kV poolel.

Analoogilised seosed kehtivad ka reaktiivvõimsuse kadude kohta:

$$\Delta Q = 3I^2 X = 3XI_A^2 + 3XI_R^2, \quad (5.12)$$

ehk

$$\Delta Q = \Delta Q_A + \Delta Q_R = X \frac{P^2}{U^2} + X \frac{Q^2}{U^2}. \quad (5.13)$$

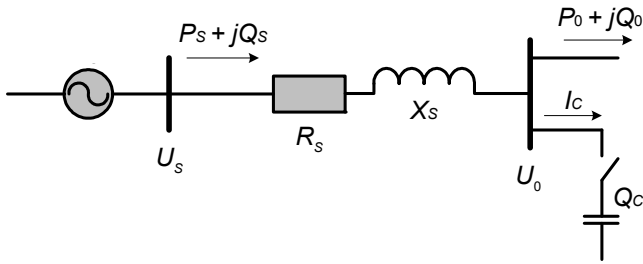
Toodud seos näitab, et reaktiivvõimsuse kaod esinevad süsteemis ka siis, kui reaktiivvõimsuse tarbimine süsteemis,  $Q = 0$ . Ülal kirjeldatud kahe variandi võrdlus näitab, et kompensatsioon võimaldab:

- vähendada aktiiv- ja reaktiivvõimsuse kadusid;
- vähendada toiteahela aktiiv- ja reaktiivkoormust;
- vähendada elektrijaamade generaatorite koormust;
- vähendada voolu ülekandeliinides ja trafodes.

Toodud arvutusseosed kehtivad lihtsustatud eeldusel, et süsteemi pingele reaktiivvõimsuse kompenseerimisel, kui lülitatakse sisse kondensaatorid, ei muutu.

## 5.6 Aktiiv- ja reaktiivvõimsus kondensaatori lülitamisel elektrisüsteemi, juhul kui arvesse võetakse pingemuutus

Juhul, kui tarbitava võimsuse arvutamisel võetakse arvesse ka kondensaatori lülitamisest tingitud pingemuutus, erinevad vastavad avaldised punktis 5.5 toodutest. Võtame aluseks aseskeemi joonisel 5.3 ja sellel toodud tähised. Üldjuhul sõltuvad elektrisüsteemist tarbitav aktiivvõimsus  $P_S$  ja reaktiivvõimsus  $Q_S$  pingest. Pingesõltuvustegurid iseloomustavad võimsuse muutusi pingele muutumisel teatavas vahemikus. Üldjuhul on aktiivvõimsuse ja reaktiivvõimsuse pingesõltuvustegurid nullist erinevad, [64].



Joonis 5.3. Aseskeem pingemuutuse mõju arvutamiseks kondensaatori lülitamisel süsteemi

Pingemuutus  $\delta U$  kondensaatori sisselülitamisel on:

$$\delta U \cong \frac{Q_C X_S}{U_0^2}. \quad (5.14)$$

kus  $Q_C$  – kondensaatori võimsus,

$X_S$  – süsteemi induktiivtakistus,

$U_0$  – pinge enne kondensaatori sisselülitamist.

Kondensaatori sisselülitamisel on aktiivvõimsuskaod vastavalt allikale [64]:

$$\Delta P \cong \frac{\Delta P_0 (1 + \tan^2 \varphi^2)}{1 + \tan \varphi_0^2} + \delta U \frac{2 \Delta P_0}{1 + \tan \varphi_0^2} [K_{PU} - 1 + \tan \varphi_0 \tan \varphi (K_{QU} - 2) + \tan \varphi^2] \quad (5.15)$$

ja reaktiivvõimsuskaod:

$$\Delta Q \cong \frac{\Delta Q_0 (1 + \tan^2 \varphi^2)}{1 + \tan \varphi_0^2} + \delta U \frac{2 \Delta Q_0}{1 + \tan \varphi_0^2} [K_{PU} - 1 + \tan \varphi_0 \tan \varphi (K_{QU} - 2) + \tan \varphi^2], \quad (5.16)$$

kus  $K_{PU}$  – aktiivvõimsuse pingesõltuvustegur,

$K_{QU}$  – reaktiivvõimsuse pingesõltuvustegur.

Kondensaatori sisselülitamisel elektrisüsteemist tarbitav aktiivvõimsus:

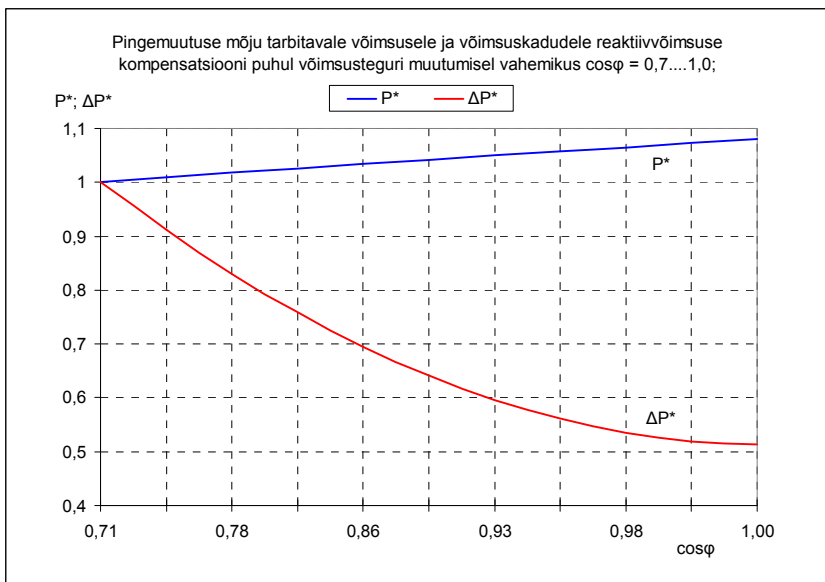
$$P_S \cong P_0 + \Delta P \quad (5.17)$$

ja reaktiivvõimsus:

$$Q_S \cong Q_0 - Q_C + \Delta Q. \quad (5.18)$$

Ülaltoodud seosed näitavad, et võimsuskadude vähenemine on kompensatsiooni puhul tegelikult veidi väiksem, kuna samal ajal pinge tõuseb ja vastavalt suureneb ka tarbitav võimsus. Samuti on näha, et võimsuskadude vähenemine toimub suuremalt osalt vahemikus  $\tan \varphi = 1 \dots 0,1$  ehk  $\cos \varphi = 0,7 \dots 0,98$ . Sellest suuremate  $\cos \varphi$  väärtuste puhul muutuvad võimsuskaod väga vähe. Muutusi tarbitavas võimsuses ja võimsuskadudes kujutab joonis 5.4.

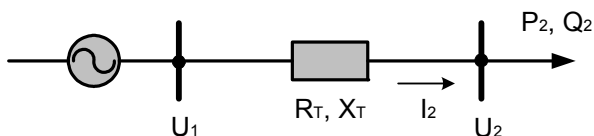




Joonisel 5.4. Võimsuse ja võimsuskadude muutus suhtelistes ühikutes reaktiivvõimsuse kompensatsioonil, kui on arvestatud kaasneva pingemuutusega

## 5.7 Trafo pingemuutus sõltuvalt faasinihkenurgast ja trafo lühispingest

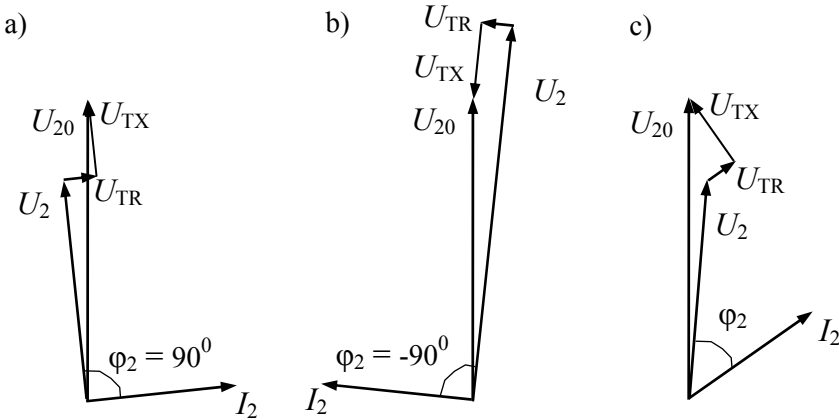
Trafo pingemuutus on trafo sekundaarmähise tühijooksupinge ja sama mähise nimikoormusel esineva pinge aritmeetiline vahe. Pingemuutuse suurus sõltub oluliselt koormuse iseloomust ja trafo parameetritest. Aktiiv-, induktiiv- või mahtvusliku koormuse puhul on pingemuutus erinev. Samuti sõltub pingemuutus trafo aktiiv- ja induktiivtakistustest. Trafo pingemuutuse arvutamisel määratakse trafo pingemuutus kõige lihtsama askeemi alusel, mis ei arvesta trafo magneetimisahelat, ja kus parameetrid on taandatud trafo sekundaarpoolele, vt joonis 5.5.



Joonis 5.5. Trafo pingemuutuse arvutamise askeem

Kui koormus (sekundaarvool  $I_2$ ) on ette antud, arvutatakse trafo sekundaarpinge  $U_2$ . Vooluvektori suuna muutuste mõju pingele ja pingemuutusele on hästi näha erinevatel vektordiagrammidel, kus vooluvektori moodul on ühesugune, joonis 5.6. Korrates arvutusi erineva iseloomuga koormustega ja võrreldes vastavaid vektordiagramme selgub, et suurim pingemuutus on võrdne trafo lühispingega  $u_k$  joonisel 5.6, a. Kui näiteks võrgus nimipingega 230 V on trafo suhteline lühispinge  $u_k^* = 5,5\%$ , siis on suurim võimalik pingemuutus 12,7 V. Kuivõrd standardiga

lubatud pingeerinevus nimipingest on  $\pm 10\%$ , siis on trafo suurim pingemuutus umbes pool lubatud pingeerinevusest. Pingemuutus on kõige suurem induktiivkoormuse puhul, sel juhul pinge tarbijal väheneb. Mahtvusliku koormuse korral võib pingemuutus olla isegi negatiivne ehk pinge tarbijal tõuseb, vt joonis 5.6, b.



Joonis 5.6. Koormuse iseloomu mõju trafo sekundaarpingele  $U_2$ : a) induktiivne koormus,  $\varphi_2 = 90^\circ$ ; b) mahtvuslik koormus,  $\varphi_2 = -90^\circ$ ; c) aktiiv-induktiivne koormus,  $\varphi_2 < 90^\circ$

Pinget ettevõtte elektrisüsteemis mõjutab reaktiivvõimsuse iseloom (induktiivne või mahtvuslik) ja selle osakaal koormuses tunduvalt rohkem kui aktiivvõimsus. Trafo pingemuutus  $\Delta U$  avaldub trafo taandatud primaarpinge ja sekundaarpinge  $U_2$  vahena järgmiselt:

$$\Delta U = |U_{20}| - |U_2| \quad \text{ehk} \quad \Delta U = |U'_1| - |U_2|, \quad (5.19)$$

kus trafo tühijooksupinge  $U_{20}$  on võrdne taandatud primaarpingega  $U'_1$ . Suhteline pingemuutus  $\Delta U_S$  avaldub järgmiselt:

$$\Delta U_S = \frac{\Delta U}{U_{20}} = 1 - \frac{U_2}{U_{20}}. \quad (5.20)$$

Suhtelise pingemuutuse avaldise saame trafo pingemuutuse vektordiagrammist:

$$\Delta U_S = 1 + \frac{U_{TX}}{U_{20}} \sin \varphi_2 + \frac{U_{TR}}{U_{20}} \cos \varphi_2 - \sqrt{1 - \left( \frac{U_{TX}}{U_{20}} \cos \varphi_2 - \frac{U_{TR}}{U_{20}} \sin \varphi_2 \right)^2}. \quad (5.21)$$

Kui faasinihkenurk  $\varphi_2$  taandatud primaarpinge  $U'_1$  ja sekundaarpinge  $U_2$  vahel on väike (mõni kraad), siis võib kasutada järgmist lihtsustatud avaldist:

$$\Delta U_S = \frac{U_{TX}}{U_{20}} \sin \varphi_2 + \frac{U_{TR}}{U_{20}} \cos \varphi_2. \quad (5.22)$$

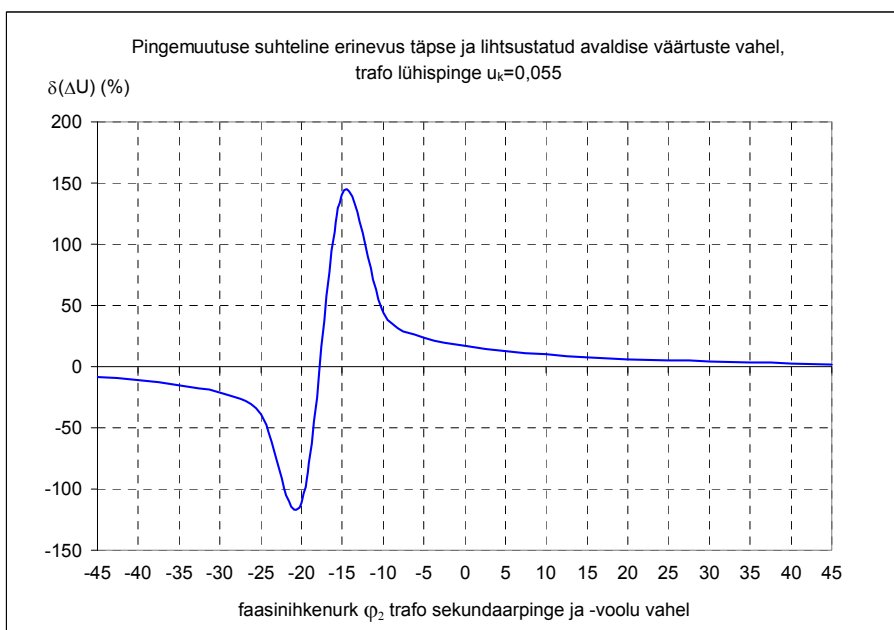
Lihtsustatud avaldise (5.22) järgi arvatud suhtelise pingemuutuse väärtus on mõnevõrra erinev täpse avaldisega (5.21) arvatud väärtusest, kusjuures pingemuutuse suhteline erinevus  $\delta(\Delta U)$  on arvutatav järgmiselt:

$$\delta(\Delta U_s) = \left( 1 - \frac{\Delta U_{S(2)}}{\Delta U_{S(1)}} \right) 100\%, \quad (5.23)$$

kus  $\Delta U_{S(1)}$  on arvutatud vastavalt avaldisele (5.21),

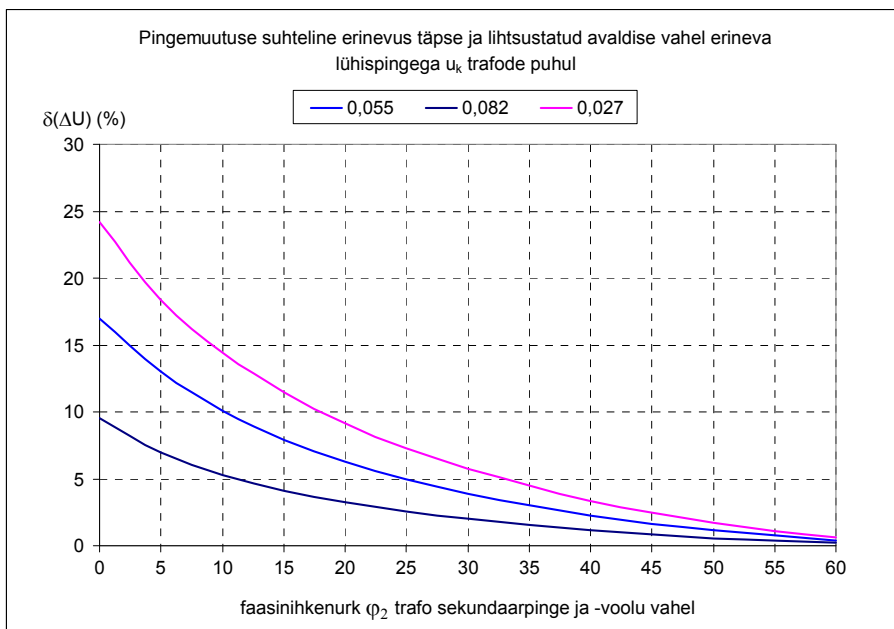
$\Delta U_{S(2)}$  on arvutatud vastavalt avaldisele (5.22).

Pingemuutuse suhteline erinevus sõltub trafo sekundaarvoolu ja pinge vahelisest faasinihkenurgast ja trafo lühispingest ning on näidatud graafiliselt joonisel 5.7.



Joonis 5.7. Pingemuutuse suhteline erinevus täpse ja lihtsustatud avaldise väärtuste vahel sõltuvalt faasinihkenurgast

Suhteline erinevus on kõige väiksem induktiivse koormuse piirkonnas ja veidi suurem aktiivkoormuse puhul, erinevus on maksimaalne piirkonnas, kus pingemuutus on absoluutväärtusena väga väike (alla 1%), s.o mahtvusliku koormuse ehk ülekompensatsiooni korral. Faasinihkenurkade puhul, mis on väiksemad kui  $-10^\circ$ , tuleb kasutada täpset avaldist. Et ettevõttes tavaliselt ülekompensatsiooni ei taotleta, siis jäävad positiivsete faasinihkenurkade puhul erinevused kuni 25 protsendini olenevalt trafo lühispinge väärtusest. Pingemuutuse suhteline erinevus sõltub ka trafo lühispingest, joonis 5.8. Enamkasutatavate trafode puhul, mille  $U_k = 5 \dots 6\%$ , on erinevus maksimaalselt kuni 20%, kusjuures lihtsustatud avaldis annab veidi suurema pingemuutuse kui täpne avaldis. Järelikult sobib aktiiv-induktiivkoormuste puhul kasutada lihtsustatud avaldist (5.22).



Joonis 5.8. Pingemuutuse suhteline erinevus täpse ja lihtsustatud avaldise vahel erineva lühispingega trafode puhul

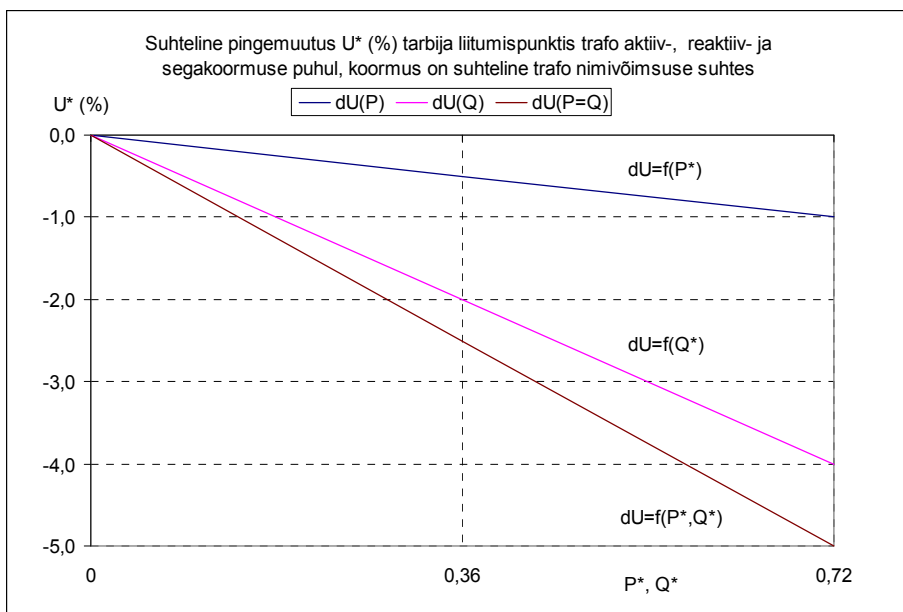
Praktilistes arvutustes on ettevõtte elektrivarustuse lähteandmete seisukohast sobivam, kui suhteline pingemuutus on avaldatud sõltuvalt tarbitavast aktiiv- ja reaktiivvõimsusest, kuna need parameetrid on kas ette antud või saab neid lihtsalt mõõta näiteks arvesti näidikult. Pinge tarbija elektrisüsteemis on määratud trafo ekvivalentsete takistustega  $R_T$  ja  $X_T$  ning tarbija aktiiv- ja reaktiivvõimsusega  $P_2$  ja  $Q_2$ . Trafo suhteline pingemuutus avaldub nende parameetrite kaudu järgmiselt:

$$\Delta U_S = \frac{U_{TX}}{U_{20}} \sin \varphi_2 + \frac{U_{TR}}{U_{20}} \cos \varphi_2 = \frac{P_2 R_T}{U_{20} U_2} + \frac{Q_2 X_T}{U_{20} U_2}. \quad (5.24)$$

Et sekundaarpinge  $U_2$  ei ole enne pingemuutuse määramist teada, tuleb kasutada lihtsustavat eeldust, et trafo sekundaarpinge on võrdne tühijooksu sekundaarpingega  $U_2 = U_{20}$ . Sel juhul saame:

$$\Delta U_S = \frac{P_2 R_T}{U_{20}^2} + \frac{Q_2 X_T}{U_{20}^2}. \quad (5.25)$$

Saadud seos näitab, et kuna ettevõtte toiteahela näivtakistus on peamiselt induktiivne, on tarbija reaktiivvõimsuse muutustel tunduvalt suurem mõju pingele kui aktiivvõimsusel. Reeglina on pingemuutus positiivse märgiga ja pinge  $U_2$  sel juhul väiksem kui  $U_{20}$ . Kuid on võimalik ka olukord, kus pinge  $U_2$  on suurem kui  $U_{20}$ . See esineb juhul, kui  $Q_2 X_T > P_2 R_T$  ja  $Q_2$  on negatiivne. Selline on näiteks olukord, kus tarbija elektrisüsteemi on lülitatud kondensaatorid, kuid aktiivkoormus puudub. Pingemuutust sõltuvalt suhtelisest koormusest ja selle iseloomust kujutab joonis 5.9. Graafik on arvutatud trafote parameetritega  $S_{nimi} = 1000$  kVA ja  $u_k = 5,5\%$ .



Joonis 5.9. Pingemuutus tarbija elektrisüsteemis sõltuvalt suhtelisest koormusest

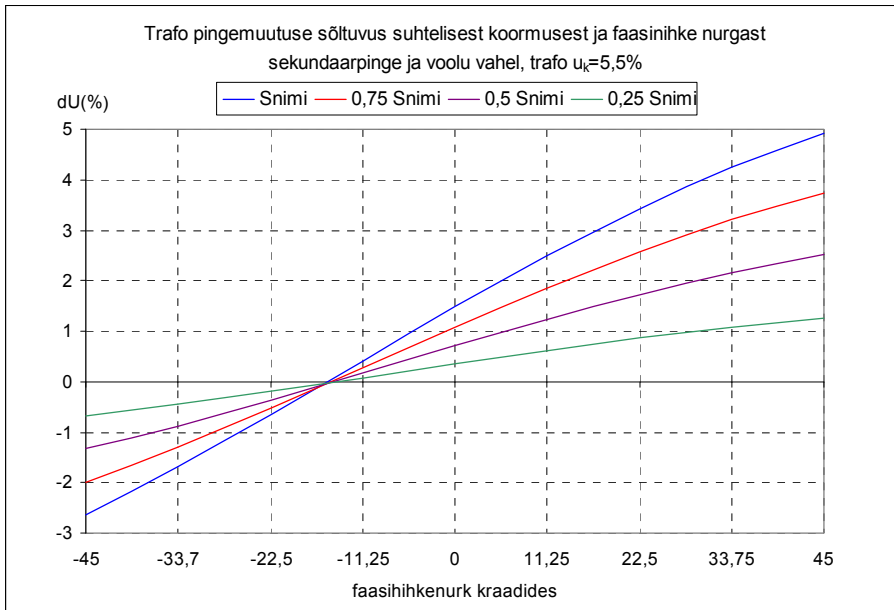
Pingemuutuse graafikult joonisel 5.9 selgub, et antud trafo puhul on reaktiivkoormuse mõju pingele aktiivkoormuse mõjust neli korda suurem. Samuti on ilmne, et elektrisüsteemis, kus tarbija aktiiv- ja reaktiivkoormused on lähteolukorras võrdsed ( $P_2 = Q_2$ ), on reaktiivvõimsuse kompensatsiooniga võimalik vähendada pingelangu trafos kuni viis korda. Järelikult tõuseb kompensatsiooniga pingeniivo ja väheneb pingeniivo hajumine.

Joonisel 5.10 on näidatud trafo pingemuutus sõltuvalt suhtelisest koormusest nimivõimsuse suhtes ja faasinihke nurgast trafo sekundaarpinge ja voolu vahel. Pingemuutus on arvatud vastavalt avaldisele (5.22) järgmiste trafo parameetritega:

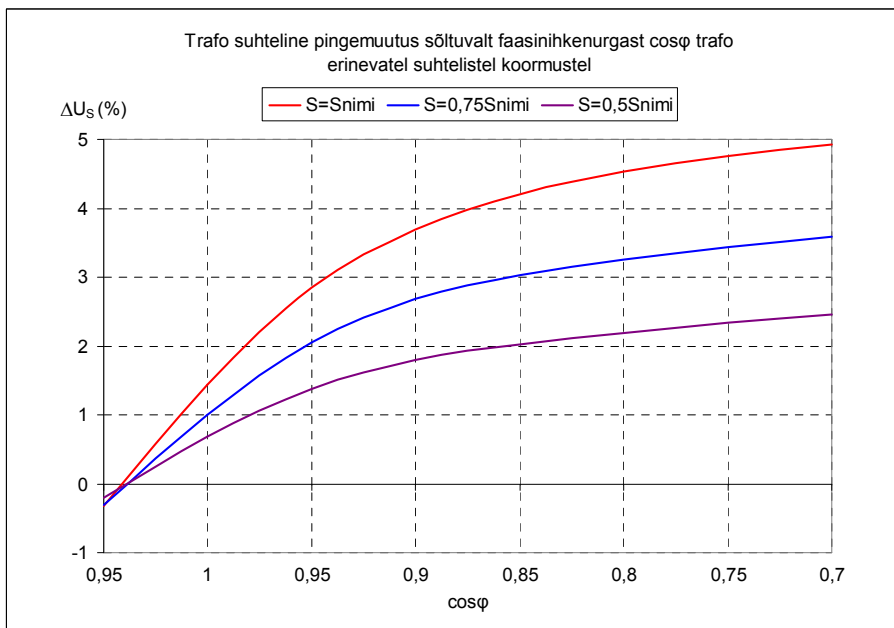
- trafo lühispinge  $u_{k\%} = 5,5\%$ ; lühispinge aktiivkomponent  $U_{TR\%} = 1,33\%$  ; lühispinge reaktiivkomponent  $U_{TX\%} = 5,32\%$ ;
- trafo sekundaarmähise tühijooksupinge  $U_{20} = 235$  V;
- trafo ühe faasi nimivõimsus  $S_{nimi} = 333$  kVA;
- trafo askeemi takistused  $R_T = 0,0022$   $\Omega$ ;  $X_T = 0,0088$   $\Omega$ .

Joonisel 5.11 on näidatud pingemuutuse väärtused sõltuvalt trafo suhtelisest koormusest nimivõimsuse suhtes ja võimsustegurist  $\cos\phi_2$ . Joonistelt 5.10 ja 5.11 selgub, et positiivsete faasinihkenurkade puhul on suurim võimalik pingelangus kuni 5% ja see esineb olukorras, kus koormus on peamiselt induktiivne (tarbitav reaktiivvõimsus on aktiivvõimsusega võrdne või sellest suurem). Reaalne pingelang, kui trafo koormus on 75%, on 3...4%. Reaktiivvõimsuse täieliku kompensatsiooni olukorras, kus  $\cos\phi = 1$ , on pingelang sama koormusega trafo puhul ca 1%. Pingemuutus muutub nulliks, kui faasinihkenurk on negatiivne ja mahtvuslik võimsustegur on  $\cos\phi = 0,96$ . Kui mahtvuslik koormus suureneb, siis muutub pingemuutus nega-

tiivseks (pingetõus) ja pinge on tühijooksupingest kõrgem. Trafo pingetõus mahtvuslike koormuste puhul võib olla 2...3%. Realse pingemuutuse kogu ulatus on 75% koormatud trafo puhul 5...7% ja see vastab trafo koormuse iseloomule aktiiv-induktiivsest kuni mahtvuslikuni.



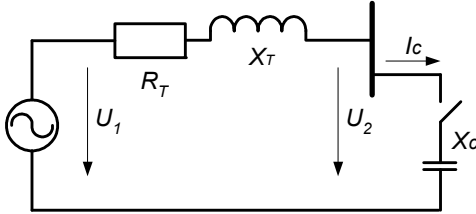
Joonis 5.10. Trafo pingemuutus sõltuvalt faasihkenurgast



Joonis 5.11. Trafo pingemuutus sõltuvalt võimsustegurist  $\cos\varphi$

## 5.8 Kondensaatorseadmest tingitud pingemuutuse arvutamine trafo koormuseta olukorras

Vaatleme, kuidas avaldub trafo pingemuutus lihtsustatud juhtumil, kui trafo on algselt tühijooksu olukorras ja trafo klemmidele lülitatakse kondensaator. Vastav askeem on toodud joonisel 5.12.



Joonis 5.12. Aseskeem kondensaatori sisselülitamisel ilma tarbija koormuseta

Kui kondensaator lülitatakse elektrisüsteemi, kus tarbija muu koormus puudub, siis pinge kondensaatoril:

$$U_2 = U_1 - (R_T + jX_T)I_C. \quad (5.26)$$

Avaldades siit kondensaatori pinge süsteemi induktiivtakistuse, aktiivtakistuse ja kondensaatori mahtuvuse kaudu, saame:

$$U_2 = \frac{U_1}{1 - \omega_0^2 L_T C + j\omega_0 C R_T}. \quad (5.27)$$

Eeldusel, et süsteemi pinge  $U_S$  jääb konstantseks, avaldub pingetõus kondensaatori sisselülitamisel järgmiselt:

$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2 = -(R_T + jX_T)I_C. \quad (5.28)$$

kus  $U_{20}$  – trafo pinge enne kondensaatori sisselülitamist,

$U_2$  – trafo pinge peale kondensaatori sisselülitamist,

$I_C$  – kondensaatori vool, kus  $I_C = U_{20} / (Z_T - jX_C)$ ,

$Z_T$  – trafo näivtakistus, kus  $Z_T = R_T + jX_T = R_T + j\omega_0 L_T$ ,

$X_C$  – kondensaatori reaktiivtakistus,  $X_C = 1 / \omega_0 C$ ,

$\omega_0$  – nurksagedus põhisagedusel.

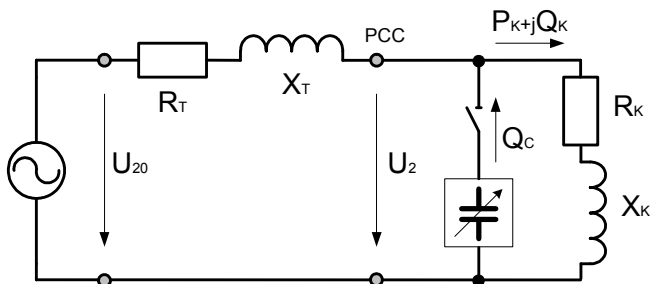
Eeldusel, et trafo askeemi aktiivtakistus on tunduvalt väiksem kui reaktiivtakistus, avaldub pingemuutus kondensaatori lülitamisel järgmiselt:

$$\Delta U_2 \approx X_{TR} |I_C|, \quad (5.29)$$

Seega sõltub pingemuutus trafo näivtakistusest ja kondensaatori voolust. Kuivõrd tavaliselt on trafo induktiivtakistus oluliselt suurem kui aktiivtakistus, siis võib lihtsustatud juhul arvutusel kasutada ainult trafo induktiivtakistuse väärtust.

## 5.9 Kondensaatorseadmest tingitud pingemuutuse arvutamine koormusega trafo puhul

Seega nägime, et kondensaatorseadme ühendamine tarbija elektrisüsteemi muudab pinget selles süsteemis. Vaatleme nüüd kondensaatori lülitamisest tingitud pingemuutuse arvutamist aseskeemis, mis sisaldab ka aktiiv-induktiivset koormusahelat, nagu näidatud joonisel 5.13.



Joonis 5.13. Kondensaatorseadme lülitamine tarbija elektrisüsteemi

Tegeliku pingemuutuse arvessevõtmiseks tarbija elektrisüsteemis arvutame pingemuutuse järgmistest seostest. Pinge tarbija elektrisüsteemi liitumispunktis  $U_2$ :

$$\underline{U}_2 = \frac{\underline{U}_{20} \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}}, \quad (5.30)$$

kus  $U_{20}$  – trafo sekundaarmähise tühijooksupinge.

Ahela kogutakistus  $Z$  on trafo takistus  $Z_T$  koos tarbija takistusega  $Z_2$ :

$$\underline{Z} = \underline{Z}_T + \underline{Z}_2. \quad (5.31)$$

Trafo sekundaarmähise näivtakistus:

$$\underline{Z}_T = R_T + jX_T, \quad (5.32)$$

kus  $R_T$  – trafo sekundaarmähise aktiivvõimsust iseloomustav takistus;

$X_T$  – trafo sekundaarmähise reaktiivvõimsust iseloomustav takistus.

Trafo sekundaarvool:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_{20}}{\underline{Z}}. \quad (5.33)$$

Tarbija elektrisüsteemi kogutakistus (tarbija koos kondensaatoriga) avaldub:

$$\underline{Z}_2 = \frac{-jX_C(R_K + jX_K)}{R_K + j(X_K - X_C)}, \quad (5.34)$$

kus  $R_K$  – koormuse aktiivvõimsust iseloomustav takistus;

$X_K$  – koormuse reaktiivvõimsust iseloomustav takistus;

$X_C$  – kondensaatorseadme mahtuvustakistus.



Pingemuutus tarbija klemmidel kondensaatori sisselülitamisel:

$$\Delta U = |U_{21}| - |U_{22}| \quad (5.35)$$

ja suhteline pingemuutus kondensaatori sisselülitamisel:

$$\delta U = \frac{|U_{21}| - |U_{22}|}{|U_{22}|}, \quad (5.36)$$

kus  $U_{21}$  – pinge enne kondensaatori sisselülitamist,

$U_{22}$  – pinge peale kondensaatori sisselülitamist.

Avaldades trafo pingemuutuse pärast kondensaatorseadme sisselülitamist tarbitava aktiiv- ja reaktiivvõimsuse kaudu, saame:

$$\Delta U = \frac{P_K R_T}{U_2} + \frac{(Q_K - Q_C) X_T}{U_2}, \quad (5.37)$$

kus  $Q_C$  – kondensaatorseadme koguvõimsus,

$P_K$  ja  $Q_K$  – tarbija koormuse aktiiv- ja reaktiivvõimsus.

Seega, et trafo pingemuutus  $\Delta U$  pärast kondensaatori sisselülitamist väheneb, siis järelikult pinge tarbija elektrisüsteemis kondensaatorseadme lülitamisel trafo 0,4 kV poolele tõuseb. Eeldusel, et aktiivvõimsuse  $P_2$  muutus pinge  $U_2$  muutusest on väike, tõuseb pinge kondensaatorite ühenduspunktis suhtelise pingemuutuse  $\delta U$  võrra:

$$\delta U(\%) \approx \frac{X_T Q_C}{U_2^2} 100. \quad (5.38)$$

Seega võime arvestada, et pingemuutus sõltub ainult trafo induktiivtakistusest ja kondensaatorseadme võimsusest ning ei sõltu tarbija koormuse parameetritest. Trafo induktiivtakistuse  $X_T$  põhisedel arvutame seosest:

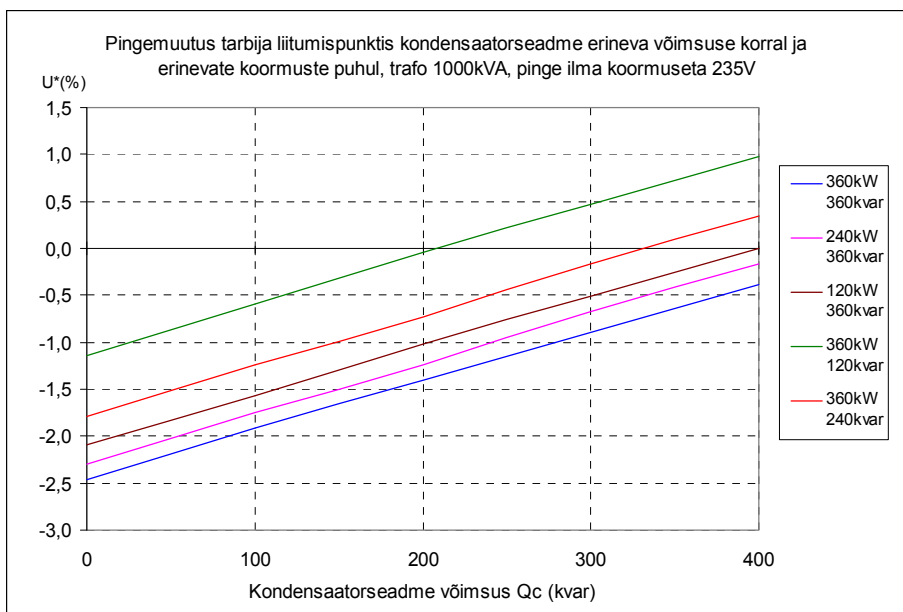
$$X_T = \frac{u_k U_{nimi}^2}{S_{nimi}}, \quad (5.39)$$

kus  $U_{nimi}$  – trafo sekundaarpoole nimiliinipinge, V;

$S_{nimi}$  – trafo nimivõimsus, VA;

$u_k$  – trafo suhteline lühispinge.

Joonisel 5.14 on toodud trafo suhteline pingemuutus tarbija erinevate koormuste puhul sõltuvalt kondensaatorseadme võimsusest, kui trafo parameetrid on  $S_{nimi} = 1000$  kVA ja  $u_k = 5,5\%$ . Nagu selgub, vähendab kondensaatorseade oluliselt reaktiivkoormusest põhjustatud pingelangu trafos ja tõstab pingeniivood tavaliselt kuni 3% võrra. Liigkompensatsiooni ehk reaktiivvõimsuse genereerimise korral on võimalik, et pinge tarbija elektrisüsteemis on isegi kuni 1% kõrgem kui trafo tühijooksu (koormuseta) olukorras.

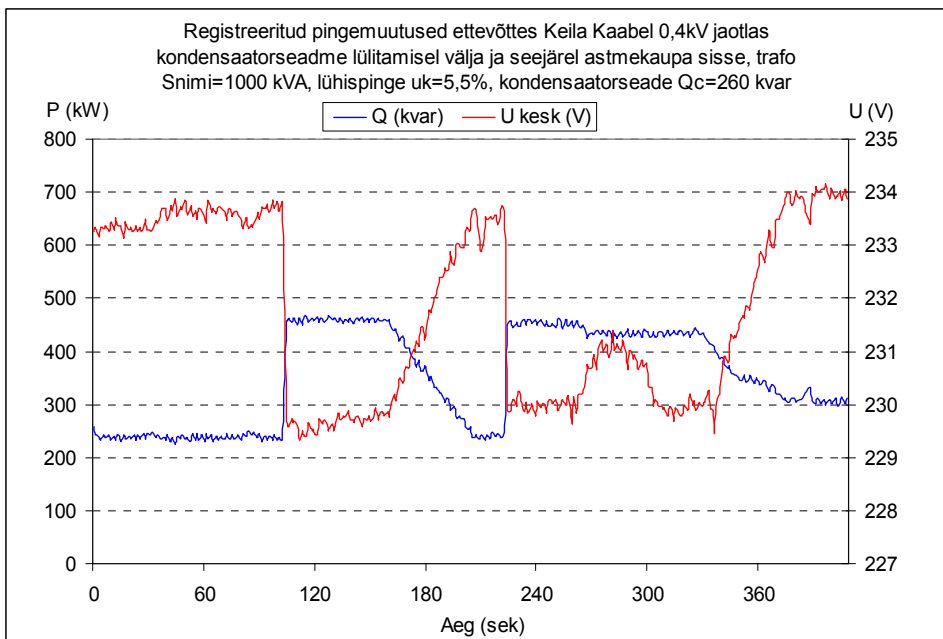


Joonis 5.14. Trafo suhteline pingemuutus erinevate koormuste puhul sõltuvalt kondensaatorseadme koguvõimsusest

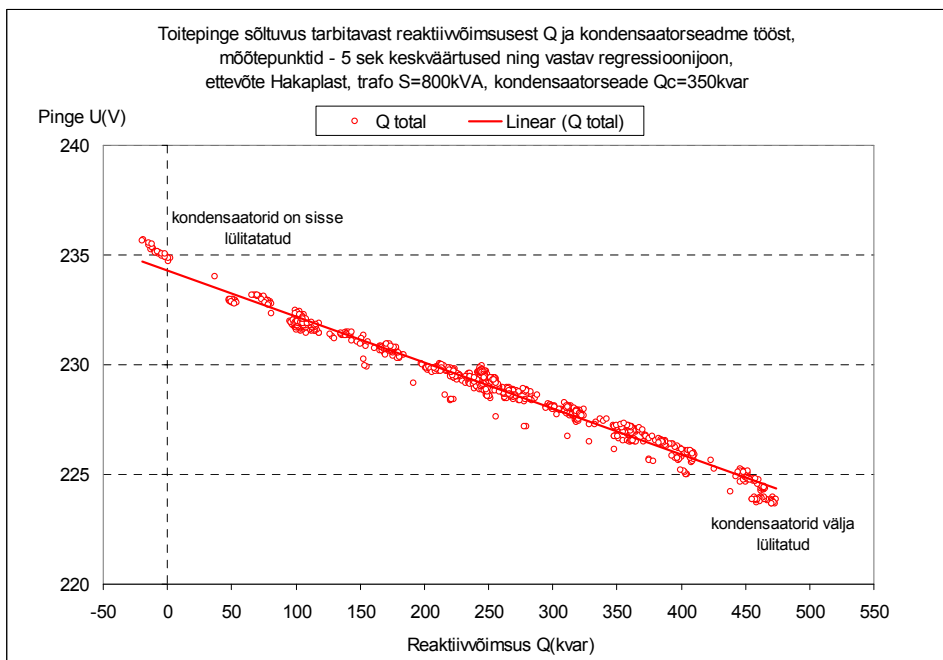
## 5.10 Pingemuutuse registreerimine ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides

Pingemuutuse mõõtmised on läbi viidud tööstusettevõtete elektrisüsteemides, kus on samaaegselt registreeritud faasipinged ja aktiiv- ning reaktiivvõimsus ettevõtte 0,4 kV jaotlas. Pinge sõltuvus reaktiivvõimsusest ajateljel on toodud joonisel 5.15, kus on parameetrite 1 s keskmised väärtused kondensaatorseadme lülitamisel algul välja ja seejärel astmekaupana sisse. Selgub, et tegelik pingemuutus oli *ca* 4 V, kusjuures kondensaatorite võimsusest ei piisa täielikuks kompensatsiooniks. Joonisel 5.16 on toodud pingemuutus sõltuvalt tarbitavast reaktiivvõimsusest. Antud elektrisüsteemis oli kondensaatorseadme võimsus 350 kvar ja see võimaldas täielikku kompensatsiooni. Selgub, et tegelik pingemuutus oli 10 V, kusjuures täieliku kompensatsiooni olukorras tekkis 5-nda harmoonilise sagedusel resonants ja vastavalt suurenes pingeline 5-s harmooniline.

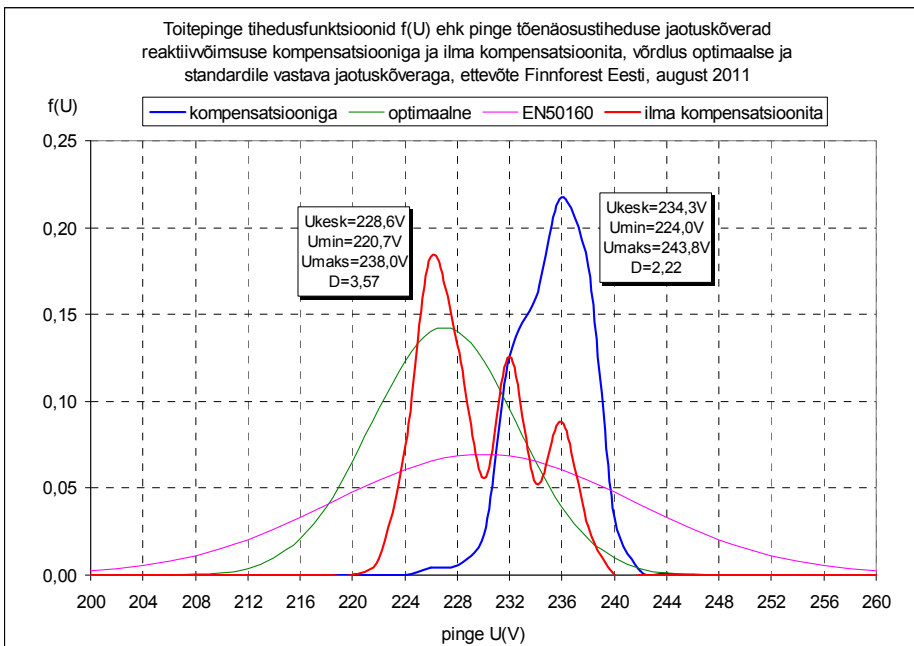
Lühiajalised mõõtmised ei anna siiski head ülevaadet pingeniivoode muutumisest. Sobivam on registreerida pingeniivo pikema ajavahemiku vältel (vähemalt 24 h). Kompensatsiooni mõju pingeniivoole on hästi jälgitav pingeline jaotuskõverate võrdlemisel. Selleks tuleb registreerida pinged kahes erinevas olukorras (ilma kompensatsioonita ja koos sellega) ja neid jaotuskõveraid võrrelda. Joonistel 5.17 ja 5.18 on toodud mõõtmistel saadud pingeline jaotuskõverad kahes puidutööstuse ettevõttes. Selgub, et muutuste iseloom pingeline jaotuskõverate kujus on sarnane, pingeline keskmine väärtus tõuseb ja hajumine väheneb. Eriti mõjutab kompensatsioon just pingeline jaotuskõvera madalamate pingete osa.



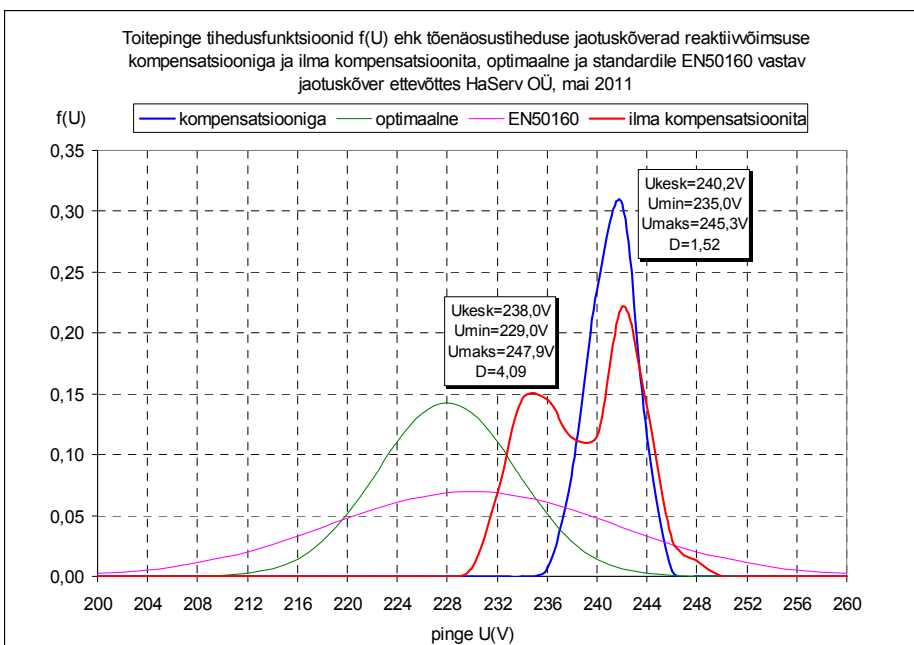
Joonis 5.15. Toitepinge muutused automaatse kondensaatorseadme lülitamisel välja ja seejärel astmekaupa sisse



Joonis 5.16. Toitepinge sõltuvus tarbitava reaktiivvõimsuse kompensatsioonitaseme muutuste mõjul



Joonis 5.17. Toitepinge tõenäosustiheduse jaotuskõvera muutused automaatse kondensaatorseadme kasutamisel



Joonis 5.18. Toitepinge tõenäosustiheduse jaotuskõvera muutused automaatse kondensaatorseadme kasutamisel

## **Järeldused kompensatsiooni mõjust pingele katsetulemuste alusel.**

Võrreldes pinge tõenäosustiheduse jaotuskõveraid ja integraalseid jaotuskõveraid ilma kompensatsioonita ja koos kompensatsiooniga toodud näidetes, saame teha järgmised järeldused.

1. Kompensatsiooni mõjul läheneb jaotuskõver oma kujult normaaljaotusele – kui ilma kompensatsioonita võib jaotuskõver olla multimodaalne, siis kompensatsiooni mõjul muutub jaotuskõver enamasti ühetipuliseks ehk unimodaalseks.
2. Kompensatsiooni mõjul muutub jaotuskõver kitsamaks, väheneb pinge hajumine. Seda näitab arvuliselt ka dispersiooni oluline vähenemine.
3. Kompensatsiooni mõjul tõuseb pingeniivo ehk keskmine pinge elektrisüsteemis, samuti tõusevad pinge miinimumväärtused.
4. Ootuspäraselt tõusevad pinged just jaotuskõvera madalamate pingete osas, mis vastavad ühtlasi suurematele koormustele. Kõrgemate pingete osas on pingetõus väiksem ja pinge maksimumväärtus peaks jääma samaks, kui keskpinge taseme juhuslikud kõikumised välja arvata.
5. Tegelikke pinge jaotuskõveraid ilma kompensatsioonita ja koos kompensatsiooniga on soovitatav võrrelda standardkohase ja antud elektrisüsteemile soovitatava jaotuskõveraga. Joonistel 5.17 ja 5.18 toodud näidetest selgub, et mõlemal juhul, nii ilma kompensatsioonita kui ka koos kompensatsiooniga, rahuldab pinge standardi EVS-EN: 50160 tingimusi, kuid kompensatsiooniga on pinge jaotuskõver standardkohase jaotuskõvera suhtes paigutatud tugevasti asümmeetriliselt ehk liialt kõrgemate pingete poole nihutatud. Seetõttu on soovitatav pärast kompensatsiooni töösse lülitamist vähendada pinget vähemalt trafo ühe astme (2,5%) võrra.
6. Selleks, et vältida ettevõtte koormuse ja jaotusvõrgu keskpinge juhuslikest muutustest tingitud mõju kahes erinevas olukorras (ilma kompensatsioonita ja koos kompensatsiooniga) registreeritud pingete jaotuskõverate mõõtetulemustele, on soovitatav registreerida pinged võimalikult sarnastes tingimustes, näiteks tööpäevadel, ettevõtte sarnase koormusega ja lähedaste õhutemperatuuridega oludes või pikema ajavahemiku (1 nädal) vältel.

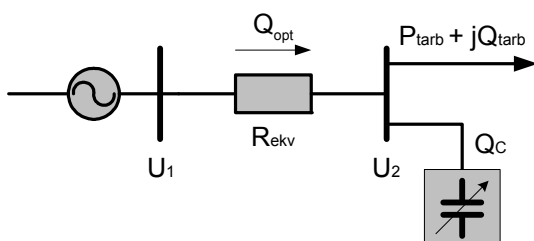
## **5.11 Reaktiivvõimsuse kompensatsiooni majanduslik tasuvus**

Ajalooliselt genereeriti nii aktiiv- kui ka reaktiivvõimsust elektri jaamade sünkroon-generaatorites ja ka suuremate ettevõtete sünkroonmasinates või sünkroonkompensaatorites. Reaktiivvõimsuse genereerimine sünkroonmasinaga toob sõltuvalt masina võimsusest kaasa võimsuskaod 10...30 W/kvar. Reaktiivvõimsuse ülekandmine läbi võrgu toob kaasa ülekandekaod ja seda eriti pingel 110 kV ja enam. Seetõttu on alates 1970-test aastatest alates hakatud eelistama reaktiivvõimsuse kompensatsiooni kondensaatoritega tarbija jaotlas võimalikult tarbija lähedal (tavaliselt 0,4 kV poolel või kõrgepingemootorite puhul ka näiteks 6 kV poolel). Kaasaegsete 0,4 kV kondensaatorite kaod on ligikaudu 0,25 W/kvar dielektriliste kadude osas ja 0,5 W/kvar kogukadude osas. Seega on kondensaatorite kaod tunduvalt väiksemad kui sünkroonmasinal. Lisaks on kondensaatoreid võimalik kasutada väga suures

pingete ja võimsuste vahemikus ja paigaldada need kompaktselt sobivasse jaotlasse, kilpi või seadmesse.

Eestis on huvi reaktiivvõimsuse kompensatsiooni vastu märgatavalt suurenenud just viimasel aastakümnel (2000...2010). Esimestel aastatel peale taasiseseisvumist (1992 kuni 1997) toimusid tööstuses suured struktuursed ja vormilised muutused ning ettevõtetel oli lahendada palju olulisi probleeme. Pealegi olid elektrivõrgud, alajaamad ja jaotusseadmed vähenenud tarbimise tingimustes suure võimsusvaruga ja tööstusettevõtted said kasutada olemasolevaid jaotusseadmeid ilma lisainvesteeringuid tegemata. Samasugune oli olukord ka kondensaatorseadmete osas. Eesti tööstus- ja põllumajandusettevõtetes oli paigaldatud suurel hulgal kondensaatorseadmeid (Nõukogude Liidu tehaste toodang, aga ka Saksa DV firmalt VEM), mille automaatjuhtimise regulaator oli kahjuks väikese töökindlusega. Selleks, et tagada regulaatorite parem töökindlus ja täpsem reguleerimine oli TTÜ elektrivarustuse automaatika laboris konstrueeritud ja seeriaviisiliselt valmistatud terve mudelite sari reaktiivvõimsuse regulaatoreid üldnimetusega REVAR, mida kasutati paljudes ettevõtetes olemasolevate kondensaatorseadmete töö juhtimiseks aastatel 1975...2000.

Reaktiivvõimsuse kompensatsioon vähendab nii aktiiv- kui ka reaktiivvõimsuse kadusid energiasüsteemis ja seega ka summaarset vajalikku võimsust elektrijaamades. Optimaalse kompensatsioonitaseme määramiseks vaatleme järgmist skeemi joonisel 5.19.



Joonis 5.19. Ülekandevõrgu, kondensaatorseadme ja tarbija aseskeem kondensaatorseadme võimsuse määramisel

Siin on ülekandevõrk (liinid ja trafod) kujutatud ühe ekvivalentse aktiivtakistusena. Tarbija klemmidele on lülitatud automaatne kondensaatorseade võimsusega  $Q_k$ . Kondensaatorseadme paigaldamine ja käigushoidmine on seotud majanduslike kuludega seadmete soetamiseks, paigaldamiseks ning jooksvaks hooldamiseks. Need kulud  $K_C$  on võrreldes kondensaatorseadme võimsusega:

$$K_C = k_C Q_C, \quad (5.40)$$

kus  $Q_C$  – kondensaatorseadme võimsus, kvar,  
 $k_C$  – kondensaatorseadme erikulu, EUR/kvar.

Erikulu  $k_C$  sõltub lisaks kondensaatorseadme maksumusele ja paigaldamiskuludele veel hoolduskuludest, mis on tavaliselt aastas 1...2% kondensaatorseadme maksumusest ning kondensaatorseadme aktiivenergiakadudest  $\Delta W_C$ , kus kaod on:

$$\Delta W_C = \Delta P_C T_C,$$

kus  $\Delta P_C$  – kondensaatorseadme aktiivvõimsuskaod, kW;

$T_C$  – kondensaatorseadme tööaeg aastas, h.

Kaokulud elektrivõrgus määratakse seosega:

$$K_{kaod} = R_{ekv} (Q_{tarb} - Q_C)^2 K_{\Delta P} / U^2, \quad (5.41)$$

kus  $K_{\Delta P}$  – kadude erimaksumus EUR/aastas/kWh kohta.

Kondensaatorseadme reaktiivvõimsuse majanduslikult põhjendatud väärtus sel juhul on määratud tingimusega, kus kaokulud  $K_{kaod}$  on minimaalsed. Reaktiivvõimsuse tarbimise optimumile vastav väärtus on:

$$Q_{opt} = Q_{tarb} - Q_C. \quad (5.42)$$

Asendades liikmed avaldistes (5.40 ja 5.41) saame:

$$Q_{opt} = \frac{K_C U^2}{2R_{ekv} K_{\Delta P}}. \quad (5.43)$$

Seos (5.43) näitab, et majanduslikult optimaalne reaktiivvõimsuse tarbimise tase ei sõltu tarbija tegelikust reaktiivvõimsusest ning sõltub ainult kadude ja kondensaatorseadme erimaksumustest ning võrgu ekvivalentsest takistusest  $R_{ekv}$  ja pingest. Seejuures parameeter  $Q_{opt}$  ei sõltu ka aktiivvõimsuse tarbimisest.

Avaldisest (5.43) saab välja tuua ka optimaalse reaktiivvõimsuse teguri  $\tan \varphi_{opt}$ :

$$\tan \varphi_{opt} = \frac{K_K (1 + \tan^2 \varphi_{tarb})}{2K_{\Delta P} \Delta P_S} = 0,2 \dots 0,3; \quad (5.44)$$

kus  $\Delta P_S$  – aktiivvõimsuse suhtelised kaod võrgus ja tarbijas (tavaliselt ca 10%);

$\tan \varphi_{tarb}$  – tarbija reaktiivvõimsuse tegur enne kompenseerimist.

Optimaalse võimsusega  $Q_K$  kondensaatorseadme suhe tarbitavasse reaktiivvõimsusesse avaldub järgmiselt:

$$\frac{Q_K}{Q_{tarb}} = \frac{Q_{tarb} - Q_{opt}}{Q_{tarb}} = 1 - \frac{\tan \varphi_{opt}}{\tan \varphi_{tarb}}, \quad (5.45)$$

Toodud seost (5.45) kasutame edaspidi ettevõtte kondensaatorseadme võimsuse määramisel. Kondensaatorseadmete kasutamise praktika on näidanud, et harilikult on olukorras, kui kompensatsioon algselt üldse puudub, kondensaatorseadmete kasutuselevõtu tasuvusaeg 1...2 aastat. Juhul, kui reaktiivvõimsuse kompensatsioon on algselt olemas, kuid mittepiisav ja/või ebatäpse juhtimisega, on uute kondensaatorseadmete tasuvusaeg 2...5 aastat. Filterreaktoritega kondensaatorseadmete tasuvusaeg on tavaliselt 3...5 aastat.

## 5.12 Automaatsed kondensaatorseadmed

### 5.12.1 Kondensaatorid

Kondensaatorseadme põhiline komponent on kondensaator. Tavaliselt kasutatava  $\Delta$  - lülituse puhul on kondensaatori võimsus  $Q_K$  (kvar) arvutatav järgmiselt:

$$Q_K = 3\omega CU^2, \quad (5.46)$$

kus  $\omega$  – võrgupinge nurksagedus,

$C$  – ühe kondensaatori mahtuvus, (F);

$U$  – liinipinge, (V).

Kuna kondensaatori võimsus sõltub pingest, siis kondensaatori tegelik võimsus:

$$Q_K = Q_{knimi} (U_C / U_{Cnimi})^2, \quad (5.47)$$

kus  $U_C$  – kondensaatori tegelik pinge,

$U_{Cnimi}$  – kondensaatori nimipinge.

Reaalses kondensaatoris esinevad kaod. Need on dielektrilised kaod, kaod voolujuhtivates osades ning tühjendustakistites. Kondensaatorite erikaod on suhteliselt väikesed. Kui Nõukogude Liidus toodetud kondensaatoritel olid erikaod kuni 4 W/kvar pingel 0,22...0,66 kV ja kuni 2 W/kvar pingel 6...10 kV, siis kaasaegsetel gaas- või geeltäitega metalliseeritud kilekondensaatoritel on dielektrilised kaod kuni 0,25 W/kvar ja kogukaod kuni 0,5 W/kvar. Kõrgepingel kondensaatoritel (1...24 kV) on erikaod veelgi väiksemad, kuni 0,2 W/kvar, [49].

Kondensaatorite tööiga on tootjate kinnitusele rohkem kui 100 000 h, ehk vähemalt 10...12 aastat. Kondensaatorid on tundlikud töötemperatuuri suhtes, lubatud temperatuurivahemik on  $-10...+50$  °C ja suurim lubatud keskkonna temperatuur  $+55$  °C (lühiajaliselt). Oluline parameeter kondensaatoritel on sisselülituse siirdevool, mis on kuni  $200 I_{nimi}$ . Võrdluseks on näiteks asünkroonmootori lülitusvool ( $6...8$ )  $I_{nimi}$ . Seega on kondensaatori lülitusvoolu impulss väga suur ja kontaktorite säästmiseks tuleb kasutada abinõusid lülitusvoolu piiramiseks.

Kondensaatorid on tundlikud pingeniivo suhtes. Vastavalt standarditele EN 60831-1 ja EN 60831-2 peavad kondensaatorid kõrgemat pinget taluma järgmiselt:

$U_{nimi} +10\%$  kuni 8 h ööpäevas,

$U_{nimi} +15\%$  kuni 30 min ööpäevas,

$U_{nimi} +30\%$  kuni 1 min ööpäevas.

Kondensaatori tühjakslaadimine peale väljalülitamist on vajalik kahel põhjusel – esiteks ohutuse tagamiseks ja teiseks, et vältida kondensaatori lülitumist vastupinge ja sellega kaasnevat ebasoovitavat siirdeprotsessi. Tühjakslaadimine toimub kas sisseehitatud takistitega või eraldi drosselitega. Takistite suurus valitakse selliselt, et jääkpinge kondensaatori klemmidel muutuks teatud aja möödudes ohutuks – langeks näiteks ühe kuni kolme minutiga ohutule tasemele 50 V või 75 V.



### 5.12.2 Harmoonilised lisakaod kondensaatorites

Kondensaatori reaktiivtakistus sageduse suurenedes väheneb, järelikult sulguvad põhisagedusest kõrgema harmoonilise sagedusega voolud läbi kondensaatori seda hõlpsamini, mida kõrgem on sagedus. Tulemusena suurenevad dielektrilised kaod kondensaatoris, kondensaator kuumeneb ja selle tööiga lüheneb.

Kondensaatori juhtivuslike ja dielektriliste kadude arvutamiseks võib kasutada ase-skeemi, mis koosneb mahtuvuse  $C$  ja aktiivtakistuse  $R_C$  jadaühendusest, [30]. Kaotegur  $\tan\delta$  on jadaühenduse puhul põhisagedusel järgmine:

$$\tan\delta = R_C \omega C . \quad (5.48)$$

Võrgu põhisagedusel on kaotegur  $\tan\delta=0,25\dots0,5$ , nagu on toodud madalpinge kondensaatorite tootjate tehnilistes andmetes. Pingemoonutuste olemasolul suurenevad dielektrilised kaod märgatavalt ja kondensaatori kaod on:

$$P_C = C \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (\tan\delta_h) \omega_h U_h^2 , \quad (5.49)$$

kus kaotegur harmoonilisel sagedusel  $\tan\delta_h = R_{Ch} \omega_h C$ , milles omakorda  $R_{Ch} = hR_C$  ja  $U_h$  on pinge  $h$ -järku harmoonilise suurus.

Madalpinge kondensaatorite puhul saab kadude avaldise esitada kujul:

$$P_C = C^2 \sum_{h=1}^{h_{\max}} R_{Ch} \omega_h^2 U_h^2 . \quad (5.50)$$

Moonutatud pingel suurenevad kondensaatori kaod tunduvalt, 3...4 korda. Kui elektrisüsteemi pingeharmooniliste koosseis ja suurused on teada, saab valemiga (5.50) arvutada, kui palju on kondensaatori võimsuskaod suuremad võrreldes olukorraga, kui pingemoonutused puuduvad. Reaalses kondensaatoriseadmes on kogukaod veelgi suuremad, sest kondensaatorikadudele lisanduvad kaod juhtmetes, kontaktorites, sularites ja ventilaatoris.

Tabel 5.6. Näide kondensaatori võimsuskadude arvutusest kahe erineva harmooniliste spektri puhul, tabelis pingespekter 1 ja 2

$h$ järk	$R_h (\Omega)$	Pinge spekter 1		Pinge spekter 2	
		$U_h (V)$	$P_h (W)$	$U_h (V)$	$P_h (W)$
1	0,005	400	13,3	400	13,3
5	0,025	15,6	2,5	20	4,2
7	0,035	7,3	1,5	14	5,6
11	0,055	1,7	0,3	6	4,0
13	0,065	1,3	0,3	4	2,9
17	0,085	0,4	0,1	2	1,6
19	0,095	0,2	0,0	2	2,3
Kaod kokku			18,1		33,9

Praktikas on võimalik hinnata kondensaatorite kadusid ligikaudselt kas mõõtes kondensaatorite temperatuuri infrapunatermomeetriga või ka lihtsalt käega. Kui kondensaatorid on õhutemperatuuril ca 20 °C käega katsudes tulised, siis on tõenäoliselt tegu suurte harmooniliste lisakadudega. Tabelis 5.6 on toodud näide kadude arvutusest kondensaatoris kahe erineva pingete spektriga, kusjuures pinge 2 vastab standardi EVS-EN 50160 piirväärtustele. Selgub, et kui siinuspinge puhul on valitud kondensaatori kaod 13,3W, siis standardi piirväärtuste kohaste pingemoonutuste puhul on kondensaatori kaod 33,9W ehk ca 2,8 korda kõrgemad.

### 5.12.3 Harmoonilistest moonutustest lähtuvad lisatingimused kondensaatoritele

Harmoonilistel pingetel ja vooludel on kondensaatoritele järgmised mõjud.

- Harmoonilised voolud võivad kondensaatori üle koormata, kuna kondensaatorite mahtuvustakistus väheneb sageduse suurenedes ja kondensaator „neelab“ endasse kõrgemate harmooniliste voolu.
- Harmoonilised pinged suurendavad dielektrilisi kadusid kondensaatorites, mis põhjustab kuumenemist ja tööea vähenemist. Kui toitepinge moonutused on suuremad kui  $THD_u > 3...4\%$ , siis kuunenevad kondensaatorid märgatavalt. Sel juhul võib kuulda iseloomulikku „sirinat“.
- Kondensaatorid moodustavad koos trafo induktiivsusega paralleelresonantsiahela harmooniliste voolude allikale. Kui süsteemis esineb harmoonilisi vooluallikaid resonantsisagedusel, siis võib kondensaatorite vool neile lubatava väärtuse ületada.

Selle tõttu on kondensaatoritele välja töötatud pinge, voolu ja võimsuse osas piirtingimused. Eeldatakse, et nende tingimuste täitmisel on kondensaatorite ootuspärane tööiga tagatud. Juhul, kui kondensaatori pinge väärtus on nimipingest suurem ja/või sisaldab harmoonilisi moonutusi, suureneb kondensaatori vool ja võimsus. Et vältida kondensaatori liigkoormust ja riknemist, peavad olema täidetud piirtingimused pinge, voolu ja võimsuse suhtes. Need piirtingimused on toodud vastavates standardites, [25, 44] ja avalduvad järgmiselt.

Kondensaatori reaktiivvõimsus on määratud selle mahtuvusega ja kondensaatorile rakendatud tegeliku pingega. Reaktiivvõimsuse nimiväärtus arvutatakse siinuselise pinge korral. Juhul kui kondensaatorile rakendatud pinge sisaldab harmoonilisi komponente, siis:

$$U = \sqrt{U_1^2 + \sum_{h=2}^{\infty} U_h^2} . \quad (5.51)$$

Kondensaatori tegeliku pinge ja nimipinge suhe peab olema:

$$\frac{U}{U_{nimi}} = \sqrt{\frac{U_1^2 + \sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}{U_{nimi}^2}} \leq 1,10 . \quad (5.52)$$

Kondensaatori tegelik vool harmooniliste moonutuste korral pinges on:

$$I^2 = \omega_1^2 C^2 \left( U^2 + \sum_{h=2}^{\infty} (h^2 - 1) U_h^2 \right). \quad (5.53)$$

Kondensaatori tegeliku voolu ja nimivoolu lubatav suhe peab olema:

$$\frac{I}{I_{nimi}} = \frac{U}{U_{nimi}} \sqrt{1 + \sum_{h=2}^{\infty} (h^2 - 1) \left( \frac{U_h}{U} \right)^2} \leq 1,3. \quad (5.54)$$

Kondensaatori võimsus nimipingel ja nimisagedusel on:

$$Q_{nimi} = \omega_{nimi} C U_{nimi}^2 \quad (5.55)$$

Kondensaatori tegeliku võimsuse ja nimivõimsuse lubatav suhe peab olema:

$$\frac{Q}{Q_{nimi}} = \frac{U^2}{U_{nimi}^2} \left[ 1 + \sum_{h=2}^{\infty} (h^2 - 1) \frac{U_h^2}{U^2} \right] \leq 1,35. \quad (5.56)$$

Kui ülaltoodud piirtingimustest üks või mitu on ületatud, siis kondensaatori puhul, mille nimipinge on  $U_{nimi1}$ , tuleb valida kondensaator kõrgema nimipingega  $U_{nimi2}$ , mis rahuldaks kõiki ülaltoodud tingimusi. Kõrgema nimipinge puhul on kondensaatori tegelik võimsus väiksem, seega peab kondensaator olema vastavalt suurema nimivõimsusega, mis rahuldaks tingimust:

$$Q_{nimi2} = Q_{nimi1} \left( \frac{U_{nimi2}}{U_{nimi1}} \right)^2. \quad (5.57)$$

Kokkuvõtteks võib öelda, et kondensaatorite valikul tuleb arvestada ettevõtte elektrisüsteemi tegeliku pingeniivoo ja selle võimalike muutustega ning samuti pinge harmooniliste moonutustega. Nimipingest kõrgemate pingete kestval esinemisel (näiteks tunde ööpäevas) või keskmisest tasemest kõrgemate harmooniliste moonutuste olemasolul pinges tuleb kondensaatorid valida kõrgema nimipingega ja vastavalt ka suurema võimsusega.

#### 5.12.4 Automaatse kondensaatorseadme valiku lähteandmed

Selleks, et automaatne kondensaatorseade annaks ettevõtte elektrisüsteemis parima tulemuse, tuleb arvesse võtta erinevaid parameetreid ja tingimusi, sh näiteks kondensaatorseadme koguvõimsus ja väiksema astme võimsus, ühenduskoht elektrisüsteemis, kondensaatorite nimipinge, toitepinge tase ja muutumise ulatus, pinge harmooniliste moonutuste tase, ühendamisvõimalused süsteemi ja keskkonnatingimused (temperatuur, tolm, vibratsioon jms).

Kuivõrd kondensaatorseadme parameetrid ja seadistus sõltuvad ettevõtte elektrisüsteemist ning reaktiivvõimsuse tarbimisest, siis on optimaalne kondensaatorseade igal konkreetsel juhul erinev. Praktikas esineb harva olukordi, kus reaktiivvõimsuse tarbimine on ajas püsiva väärtusega või väikese muutumisvahemikuga ja vajaliku

kondensaatorseadme võimsuse määramiseks piisab ainult pistelisest reaktiivvõimsuse mõõtmisest või kuus tarbitud keskmisest reaktiivenergiast. Sage-damini on ettevõtetes tarbitav reaktiivvõimsus suurtes piirides muutuv ning opti-maalse kompensatsiooni saavutamiseks on vaja teada aktiiv- ja reaktiivvõimsuse koormusgraafikuid vähemalt ühe nädala vältel.

Seega on kondensaatorseadme võimsuse, konstruktsiooni, paigalduse ja seadistuse optimaalseks valikuks vaja teada rida lähteandmeid ja parameetreid alajaama või trafo elektritarbimise kohta ning sellele lisaks veel paigaldustingimuste ja ühen-damisvõimaluste kohta jaotlas. Vajaminevad lähteandmed on järgmised:

- ettevõtte (trafo) reaktiivvõimsuse ja aktiivvõimsuse koormusgraafikud kas ühe nädala või ühe kuu vältel;
- ettevõtte (trafo) suurim kasutusvõimsus  $P_{60max}$ , (kW) ja trafo nimivõimsus  $S$ , (kVA);
- pinge ja voolu harmoonilised moonutused  $THD_u$  ja  $THD_i$ , oluliste voolumoonutuste puhul ka vooluharmooniliste sagedusspekter;
- ettevõtte (trafo) reaktiivenergia  $W_Q$  tarbimine kuude lõikes aastas, (kvarh);
- ettevõtte (trafo) aktiivenergia  $W_A$  tarbimine kuude lõikes aastas, (kWh);
- kondensaatorseadme paigaldustingimused ja ühendamine (paigaldus-tingimused, kaablite sisestus, voolutrafo ülekandesuhe ja ava mõõdud).

Ülaltoodud andmete põhjal saab teha esialgse valiku kondensaatorseadme kogu-võimsuse ja astmete suuruse osas, et sellest lähtudes valida pakutavast konden-saatorite või automaatsete seadmete reast sobiva võimsuste suhtega seade.

### 5.12.5 Automaatse kondensaatorseadme võimsuse valiku kriteeriumid

Kondensaatorseadme koguvõimsus on oluline parameeter, sest sellest sõltub otseselt seadme maksumus, paigaldus ja mitmed teised tehnilised tingimused. Väiksema astme võimsuse valikul lähtutakse koguvõimsusest ja tootja pakutavast konden-saatorite reast. Harilikult jagatakse koguvõimsus 6-ks kuni 12-ks võrdseks osaks ja seejärel valitakse astmete suhted. Kondensaatorseadme koguvõimsuse valikul on võimalik lähtuda neljast erinevast parameetrist. Need neli parameetrit on – suurim reaktiivvõimsus, keskmine reaktiivvõimsus, trafo nimivõimsus ning aktiiv- ja reak-tiivvõimsuse koormusgraafikud. Seega võib võimsuse valik toimuda neljal erineval viisil.

1. Valik suurima tarbitava reaktiivvõimsuse järgi, kus vajaliku reaktiivvõimsuse lähteväärtus  $Q_{max}$  (reaktiivvõimsuse 1 h suurim keskvärtus) saadakse jaotus-võrgu andmebaasist või mõõdetakse koormusmaksimumi ajal kas otse arvestilt või sobiva mõõteriistaga. Selline kondensaatorseadme võimsuse valik tagab väga kõrge võimsusteguri  $\cos\varphi$  ja madala  $\tan\varphi$ , seega väga väikesed otsesed reaktiiv-energia kulud, tõenäoliselt jääb  $\tan\varphi$  väärtus vahemikku 0,02...0,1. Valiku puuduseks on kondensaatorseadme ja selle paigaldamise kõrge maksumus ja tõenäoliselt võimsuse asjatu üledimensioneerimine ning ülekompensatsioon (reaktiivvõimsuse genereerimine) madalamate koormuste olukorras, samuti on oht

paralleelresonantsiks harmooniliste moonutuste korral tarbitavas voolus. Sellise ohu välistamiseks saab kasutada filterreaktoritega seadet, kuid sel juhul on see kindlasti investeeringuna kõige kallim variant.

2. Valik keskmise tarbitava reaktiivvõimsuse järgi, kus reaktiivvõimsuse lähteväärtus  $Q_{kesk}$  (reaktiivvõimsuse 1 h keskmine kuus) saadakse kuus tarbitud reaktiivenergia näidu jagamisel kuu tundide arvuga ja korrutamisel kahega. Selline kondensaatorseadme võimsuse valik tagab kõrge võimsusteguri  $\cos\varphi$  ja madala  $\tan\varphi$ , seega väikesed otsesed reaktiivenergia kulud, tõenäoliselt jääb  $\tan\varphi$  väärtus vahemikku 0,1...0,2. Kondensaatorseadme optimaalne võimsus peaks olema selline, et kuu lõikes saavutatakse  $\tan\varphi$  väärtuseks 0,15. Sageli annab sellise tulemuse automaatne kondensaatorseade, mille võimsus on 0,65...0,7 suurimast tarbitavast reaktiivvõimsusest (nn kahe kolmandiku reegel) või kaks korda suurem kuu keskmisest reaktiivvõimsusest. Seega tõenäoliselt piisab kondensaatorseadme võimsusest, kui:

$$Q_C = 0,65...0,7Q_{max} = 2Q_{kesk} \quad (5.58)$$

Siiski sobib selline valik ainult teatud tüüpi reaktiivvõimsuse koormusgraafikute puhul ja võimsus võib suurte kõikumistega reaktiivvõimsuse puhul jääda kas oluliselt suuremaks või väiksemaks optimaalsest võimsusest, nagu selgub alltoodud arvutusnäidetes tegelike mõõtetulemustega.

3. Valik trafo nimivõimsuse järgi. Nimivõimsusest lähtudes valitakse kondensaatorseadme maksimaalne võimsus selliselt, et paralleelahela trafo–kondensaator resonantsisagedus jääks kindlalt alati kõrgemale nii voolus kui ka pinges domineerivatest 5-ndast ja 7-ndast harmoonilisest, seega kõrgemale näiteks 8-nda harmoonilise sagedusest  $f_{res} \geq 8f_1$ . Tõenäoliselt ei piisa sellise võimsusega kondensaatorseadme võimsusest tipukoormuste ajal, kuid kuu lõikes on keskmine võimsustegur  $\cos\varphi = 0,95...0,97$  ja  $\tan\varphi = 0,2...0,25$  saavutatav ning resonantsid 5-nda ja 7-nda harmoonilise sagedusel on välditud. Enamlevinud trafodele vastavad kondensaatorseadme võimsused on toodud järgnevas tabelis.

Tabel 5.6. Kondensaatorseadme võimsuse valik trafo nimivõimsuse järgi

$S_{trafo}$ , (kVA)	250	400	630	1000	1600	2000
$Q_K$ , (kvar)	70	110	140	230	360	450

4. Valik aktiiv- ja reaktiivvõimsuse koormusgraafikute ja etteantud soovitava reaktiivvõimsuse teguri  $\tan\varphi$  järgi. Kondensaatorseadme võimsuse ja astmete suuruse täpsemaks valikuks on vaja teada ettevõtte aktiivvõimsuse ja reaktiivvõimsuse koormusgraafikuid  $P = f(t)$  ja  $Q = f(t)$ . Sel juhul antakse reaktiivvõimsuse tegur  $\tan\varphi$  ette soovitava väärtusena ja vastavalt tegelikele aktiiv- ja reaktiivvõimsuse koormusgraafikutele ja reaktiivvõimsuse integraalsele jaotuskõverale arvutatakse vajaliku kondensaatorseadme võimsus, mis tagab etteantud võimsusteguri väärtuse kuu keskmisena.

Kondensaatorseadme optimaalne võimsus saadakse reaktiivvõimsuse integraalselt jaotuskõveralt funktsiooni  $F(Q_{K,opt})$  sellelt kohalt, kus funktsiooni väärtus avaldub järgmiselt:

$$F(Q_{K,opt}) = 1 - \frac{\tan \varphi_{opt}}{\tan \varphi_{teg}}. \quad (5.59)$$

Sellise valiku eeliseks on, et seade valitakse optimaalse võimsusega ja seega ka mõistliku hinnaga. Kuivõrd koormusgraafikud on juba mõnda aega hõlpsasti saadavad Jaotusvõrgu andmebaasist, siis tuleks eelistada viimast varianti. Juhul, kui koormusgraafikuid pole võimalik saada, tuleb registreerida koormusgraafikud näiteks ühe nädala vältel.

### 5.12.6 Automaatse kondensaatorseadme võimsuse valiku näiteid

Alljärgnevalt on näidetena kirjeldatud kondensaatorseadmete võimsuse valikut lähtudes koormusgraafikute mõõtetulemustest ettevõtetes.

**Näide 1.** Esimene näide on toodud mööblitööstusest AS Bodilsen Eesti, kus reaktiivvõimsuse kompensatsioon algselt puudus. Registreeriti ettevõtte aktiiv- ja reaktiivvõimsuse koormusgraafikud enne kondensaatorseadme paigaldamist. Suurim tarbitud reaktiivvõimsus oli 500 kvar ja keskmine 270 kvar.

Kondensaatorseadme võimsuse valikuks esitame tarbitava reaktiivvõimsuse integraalse jaotuskõverana, kus horisontaalteljel on tarbitav reaktiivvõimsus ning vertikaalteljel selle esinemise integraalne tõenäosus. Valime soovitavaks  $\tan \varphi_{opt} = 0,15$ , seega soovime reaktiivvõimsuse teguri  $\tan \varphi$  vähenemist 5,73 korda ehk 17 protsendini lähteväärtusest. Kondensaatorseadme võimsuse  $Q_K$  saame graafikult joonisel 5.20, kus see on märgitud ringiga kõveral  $f(Q)$ .

$$Q_K = F(Q_{K,opt}) = 1 - \frac{\tan \varphi_{opt}}{\tan \varphi_{teg}} = F(83\%) = 400 \text{ kvar} \quad (5.60)$$

Vastavalt valikule keskmise reaktiivvõimsuse järgi saame:

$$Q_K = 2Q_{keskm} = 540 \text{ kvar.}$$

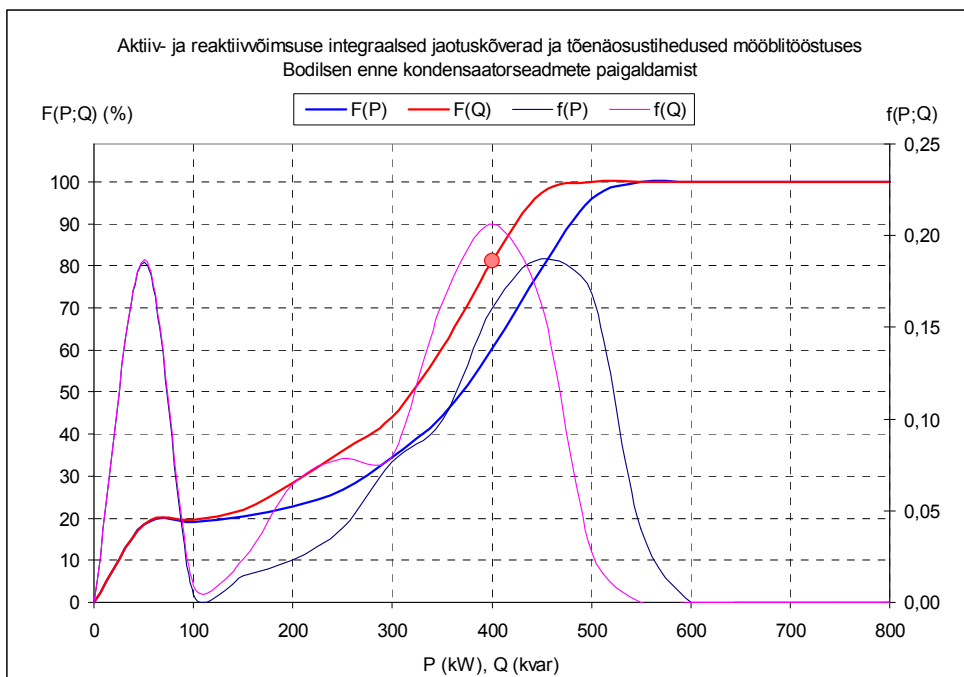
Vastavalt valikule suurima reaktiivvõimsuse järgi saame:

$$Q_K = 0,65Q_{max} = 325 \text{ kvar.}$$

Vastavalt valikule trafo võimsuse järgi saame  $Q_K = 230$  kvar.

Järeldused: toodud näites annavad lähedase tulemuse valikud optimaalse võimsuse ja reaktiivvõimsuse maksimumi järgi. Valik keskmise reaktiivvõimsuse ja trafo võimsuse järgi ei sobi. Tegelikult valiti kondensaatorseadme võimsuseks 350 kvar, mis andis tulemuseks  $\tan \varphi_{teg} = 0,14$ , vt joonis 5.21.

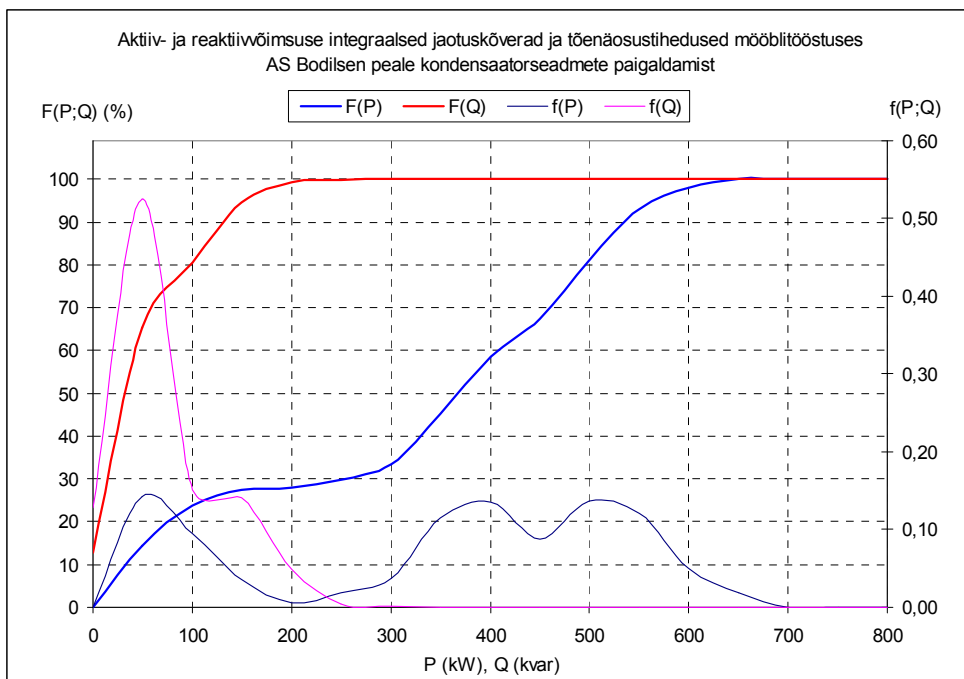
Kui ettevõtte kuu keskmine  $\tan \varphi$  enne kondensaatorseadmete paigaldamist oli 0,86, siis pärast kondensaatorseadmete paigaldamist on see 0,08. Seega on reaktiivenergia tarbimine vähenenud ca 10 korda ja kondensaatorseadmete tasuvusaeg oli ca üks aasta.



Joonis 5.20. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse integraalsed jaotuskõverad ja tõenäosustihedused mööblitööstuses, kondensaatorseadme optimaalne võimsus on märgitud punase ringiga

Lühikese tasuvusaja annab puidutööstusele iseloomulik olukord, kus tööpinkides on kasutusel hulgaliselt vähekoormatud asünkroonmootoreid, mille keskmine koormus on ainult 15...20%. Puidutöötlemispinkide mootorid on suure võimsusvaruga kahel põhjusel: esiteks peab pink suutma töötada ka kõige raskema koormusega, mis antud pingile lubatud (kõige jämedam või paksem materjal), ja teiseks peab olema tagatud töödeldud pinna nõuetekohane kvaliteet, seega ei tohi mootori kiirus tööprotsessi käigus kuigivõrd langeda.

Pärast kondensaatorseadme paigaldamist ja tööselülitamist tõuseb pingete ettevõtte 0,4 kV poolel. Keskmise pingeniivoo tõus on tavaliselt 1,5...2,5%. Seega, kui keskmine pingeniivoo oli enne kondensaatorseadme paigaldamist optimaalne, siis peale kondensaatorseadmete paigaldamist osutub see optimaalsest kõrgemaks ja pingetõusust tingitud täiendava energiakulu vältimiseks tuleb pingeniivood vähendada trafo ühe astme (tavaliselt 2,5%) võrra. Kui pingeniivood pärast kondensaatorseadme paigaldamist ei kontrollita/reguleerita, siis on oht, et ettevõtte elektrikulud ei vähene, vaid hoopis suurenevad. Põhjuseks on asjaolu, et kompensatsiooniga kaasneva pingetõusu tõttu kasvab ka aktiivenergia tarbimine ning samuti reaktiivenergia tarbimine. See selgub ettevõtte aktiiv- ja reaktiivvõimsuse staatiliselt karakteristikult.



Joonis 5.21. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse integraalsed jaotuskõverad ja tõenäosustihedused mööblitööstuses pärast kondensaatorseadmete paigaldamist

**Näide 2.** Näide on toodud olukorra kohta puidutööstuses, kus osaline kompensatsioon on olemas, aga seda soovitakse täiendada. Siin annab kondensaatorseadme võimsuse optimeerimise meetodika tunduvalt täpsema tulemuse kui valik  $Q_{kesk}$  või  $Q_{max}$  järgi. Valiku tegemiseks esitame ettevõtte reaktiivvõimsuse koormusgraafiku integraalse jaotuskõverana, kus horisontaalteljel on tarbitav reaktiivvõimsus ning vertikaalteljel selle esinemise integraalne tõenäosus. Graafik on toodud joonisel 5.22.

Ettevõtte tegelik  $\tan\varphi$  enne täiendavat kompenseerimist oli 0,34. Suurim tarbitud reaktiivvõimsus oli  $Q_{max} = 570$  kvar ja keskmine  $Q_{kesk} = 160$  kvar. Valime soovitavaks  $\tan\varphi_{opt} = 0,15$ , seega soovime reaktiivvõimsuse teguri  $\tan\varphi$  vähenemist 2,27 korda ehk 44 protsendini lähteväärtusest. Sobiva kondensaatorseadme võimsus  $Q_K$  peaks siis olema:

$$Q_K = F(Q_{K,opt}) = 1 - \frac{\tan\varphi_{opt}}{\tan\varphi_{teg}} = F(56\%) = 150 \text{ kvar} . \quad (5.61)$$

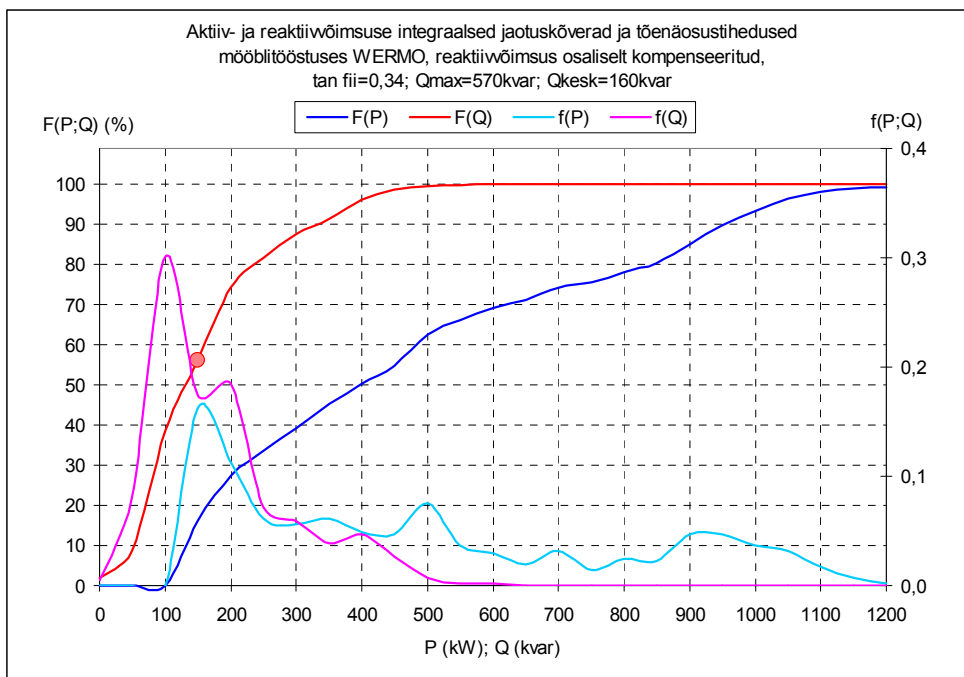
Vastavalt valikule keskmise reaktiivvõimsuse järgi saame:

$$Q_K = 2Q_{kesk} = 320 \text{ kvar} .$$

Vastavalt valikule suurima reaktiivvõimsuse järgi saame:

$$Q_K = 0,65 \cdot Q_{max} = 370 \text{ kvar} .$$





Joonis 5.22. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse integraalsed jaotuskõverad ja tõenäosustihedused mööblitööstuses, kondensaatorseadme optimaalne võimsus on märgitud punase ringiga

Seega annab soovitud tulemuse kondensaatorseade võimsusega 150 kvar, mis on oluliselt väiksema võimsusega ja ilmselt ka tunduvalt odavam kui teised variandid. Järeldus sellest näitest: olukorras, kus ettevõttes on reaktiivvõimsus juba osaliselt kompenseeritud, annab lähtumine tegelikust reaktiivvõimsuse jaotuskõverast tunduvalt täpsema tulemuse.

**Näide 3.** Toiduainetetööstuse ettevõtte Võro Kommerts tegelik  $\tan\varphi$  oli enne kompenseerimist 0,34. Suurim tarbitud reaktiivvõimsus oli  $Q_{max} = 63$  kvar ja keskmine  $Q_{kesk} = 41$  kvar, vt joonis 5.23. Valime soovitavaks  $\tan\varphi_{opt} = 0,15$ , seega soovime reaktiivvõimsuse teguri  $\tan\varphi$  vähenemist 2,27 korda ehk 44 protsendini lähteväärtusest. Siis peaks sobiva kondensaatorseadme võimsus  $Q_K$  olema:

$$Q_K = F(Q_{K,opt}) = 1 - \frac{\tan\varphi_{opt}}{\tan\varphi_{ieg}} = F(56\%) = 41 \text{ kvar} . \quad (5.62)$$

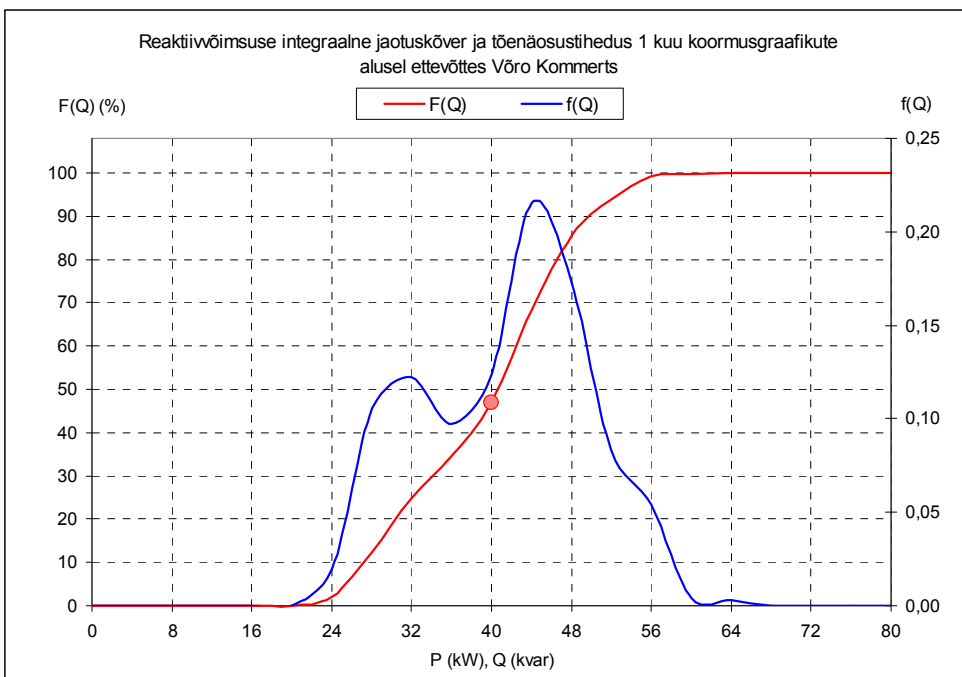
Vastavalt valikule keskmise reaktiivvõimsuse järgi saame:

$$Q_K = 2Q_{kesk} = 82 \text{ kvar}.$$

Vastavalt valikule suurima reaktiivvõimsuse järgi saame:

$$Q_K = 0,65Q_{max} = 41 \text{ kvar}.$$

Seega annab soovitud tulemuse kondensaatorseade võimsusega 40...45 kvar, mis antud juhul langeb kokku valikuga suurima reaktiivvõimsuse järgi.



Joonis 5.23. Reaktiivvõimsuse integraalne jaotuskõver ja tõenäosustihedus toiduainete-tööstuses, kondensaatorseadme optimaalne võimsus on märgitud punase ringiga

**Näide 4.** Puidutööstuse ettevõtte HaServ trafo tegelik  $\tan\varphi$  oli enne kompenseerimist 0,73. Suurim tarbitud reaktiivvõimsus oli  $Q_{max} = 370$  kvar ja keskmine  $Q_{kesk} = 220$  kvar, joonis 5.24. Valime soovitavaks  $\tan\varphi_{opt} = 0,15$ , seega soovime reaktiivvõimsuse teguri  $\tan\varphi$  vähenemist 4,86 korda ehk 20 protsendini lähteväärtusest. Siis peaks sobiva kondensaatorseadme võimsus  $Q_K$  olema:

$$Q_K = F(Q_{K,opt}) = 1 - \frac{\tan\varphi_{opt}}{\tan\varphi_{teg}} = F(80\%) = 340 \text{ kvar} . \quad (5.63)$$

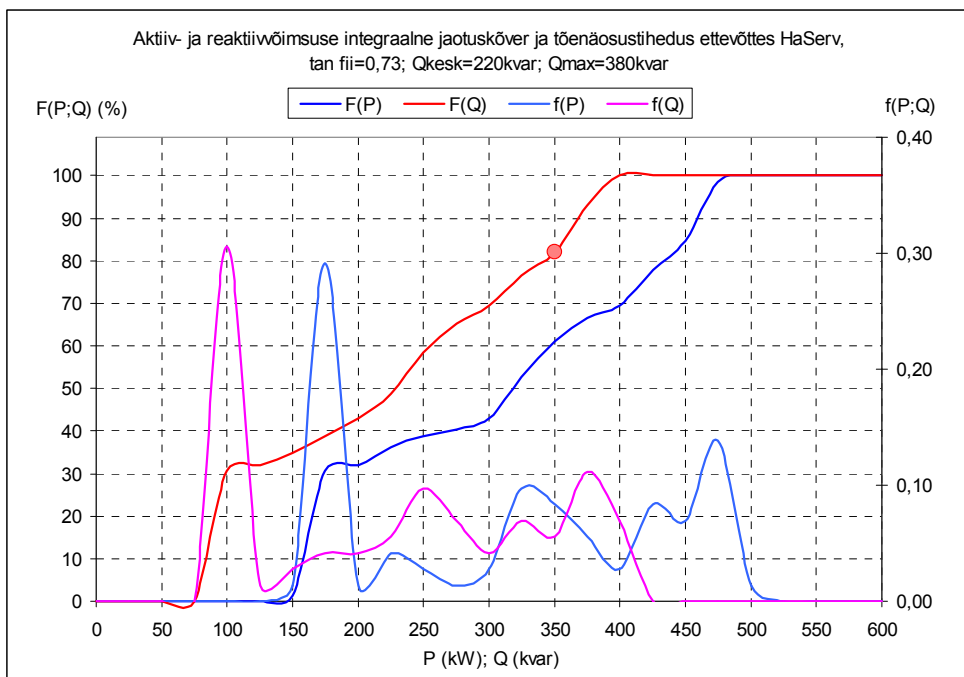
Vastavalt valikule keskmise reaktiivvõimsuse järgi saame:

$$Q_K = 2Q_{kesk} = 440 \text{ kvar}.$$

Vastavalt valikule suurima reaktiivvõimsuse järgi saame:

$$Q_K = 0,65Q_{max} = 240 \text{ kvar}.$$

Seega annab soovitud tulemuse kondensaatorseade võimsusega 340 kvar, mis on ka kõige lähedasem tegelikult paigaldatud kondensaatorseadme võimsusele 350 kvar.



Joonis 5.24. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse integraalne jaotuskõver ja tõenäosustihedus puidutööstuses, kondensaatorseadme optimaalne võimsus on märgitud punase ringiga

### 5.12.7 Automaatse kondensaatorseadme regulaatori sätete valik

Kaasaegsed mikroprotsessoriga reaktiivvõimsuse regulaatorid (kontrollerid) võimaldavad seadistada suurt hulka parameetreid kondensaatorseadme optimaalse töö kindlustamiseks. Neist parameetritest on olulisemad eesmärgistatud  $\cos\varphi$  väärtus, astmevõimsuste rida, viited kondensaatorite sisselülitamisel ja korduvlülitamisel, samuti vooluharmoniliste piirväärtus. Eesmärgistatud  $\cos\varphi$  optimaalne väärtus on tavaliselt 0,98...1,00. Kuna voolu mõõdetakse ainult ühes faasis, siis faaside voolukoormuste asümmeetria puhul või ka juhul, kui kommertsarvesti paikneb trafo kõrgepinge poolel, võib osutada optimaalseks ka mahtuvusliku  $\cos\varphi$  sätte valik, näiteks  $-0,98$ . Täpsustatud  $\cos\varphi$  sätte valiku saab teha alles lähtudes mõne kuu aktiiv- ja reaktiivenergia andmetest ja pärast tegelike  $\tan\varphi$  väärtuste arvutamist iga kuu kohta. Kondensaatorseadme astmete arvu ja astmete võimsuste vahelise suhte osas on praktikas osutunud optimaalseks järgmised võimsuste suhte read:

$$1:1:1:1\dots \text{ või } 1:1:2:2\dots \text{ või } 1:2:2:2\dots \text{ või } 1:2:4:4.$$

Selliste astmevõimsuste suhete puhul kujuneb lülituste arv väikeseks, seadme töö sujuvaks ja seade ise konstruktsioonilt lihtsamaks ja odavamaks. Kondensaatorite sisselülitamisviide peaks olema 10...20 s ja tühjenemisviide (ehk korduvlülitusviide) 2...3 min. Regulaatorid võimaldavad tavaliselt jälgida ka vooluharmoniliste teguri  $THD_i$  väärtust trafo voolus ning etteantud piirväärtuse ületamisel on võimalus kondensaatorid välja lülitada. Harilikult on trafo voolu harmooniliste teguri väärtus

vahemikus 3...40%. Regulaatori sätteväärtuseks on sobiv valida 20...30% sõltuvalt kondensaatorite nimipingest.

### **5.12.8 Kondensaatorseadme koostisosade valik**

Tulenevalt võimsuste reast ei ole kondensaatorseadmetes mõtet kasutada suurt arvu erinevaid kondensaatoreid. Ettevõtete reaktiivvõimsuse tarbimise mahu juures on soovitatav valida kondensaatorid praktikas juba sobivaks osutunud võimsuste reast, näiteks 12,5 : 25 : 50 kvar või 10 : 20 : 40 kvar või 15 : 30 : 30 kvar.

Kondensaatorite nimipingete rida võrgupingel 3×400 V pakub erineva nimipingega kondensaatoreid reast 400 V, 415 V, 440 V, 460 V, 480 V ja 525 V ning keskpingel 6kV näiteks 6,3kV, 6,6kV ja 7,2kV. Olukorras, kus ettevõttes on arvestataval määral muundureid jt mittelineaarseid tarviteid ja/või pingeniivoo on sageli kõrgem kui 400 V, tuleks kindlasti eelistada kõrgema nimipingega kondensaatoreid. Kuigi kondensaatori tegelik võimsus madalamal pingel väheneb pinge ruudu järgi, on saavutatav töökindluse tõus olulisem.

Kondensaatorseadme kontaktorite, sularite ja juhtmete valik toimub voolu järgi. Kontaktorite ja sularite nimivool peaks olema 1,5 korda suurem kondensaatori nimivoolust ja juhtmete ristlõike varu voolu järgi peaks olema vähemalt kahekordne, soovitatavalt aga kolmekordne. Praktika on näidanud, et sellised varutegurid on kondensaatorseadme pikaajalise tõrgeteta töö kindlustamiseks vajalikud.

Automaatse kondensaatorseadme konstruktsiooni ja paigalduse juures tuleb arvestada ka jahutustingimusi. Kondensaatoritele lubatud töötemperatuur on vahemikus –10 °C kuni +50 °C. Seega on kondensaatorid õhutemperatuuri suhtes tundlikud. Kuna kondensaatorseade soojeneb tööolukorras märgatavalt, siis kondensaatorseadme kilbisine temperatuur võib kergesti tõusta tasemeni +50 °C ja kõrgemale. Hinnanguliselt on ilma reaktoriteta automaatse kondensaatorseadme soojuskaod vahemikus 1...2 W/kvar kohta. Seega eraldab 100 kvar võimsusega kondensaatorseade 100...200 W soojust, mille ärajuhtimiseks peab olema võimalus kas loomuliku või sundventilatsiooni abil. Soojuskaod võivad olla ka märgatavalt suuremad. Kui pinge harmooniliste moonutuste tase on 6...8%, on tarbitud energia järgi mõõdetud aktiivkaod 0,34% seadme võimsusest ehk 3,5 W/kvar.

### **5.12.9 Siirdeprotsessid kondensaatori sisselülitamisel**

Kondensaatori sisselülitamisel esineb alati siirdeprotsess, kui võrgu pinge ja kondensaatori pinge on erinevad. Kuna kondensaatori pinge ei saa hüppeliselt muutuda, siis lülitamise hetkel saavutab vool oma suurima väärtuse ja pinge samal ajal väheneb. Lülitusvoolu impulsi amplituud kondensaatori sisselülitamisel võib olla kuni 200-kordne nimivool. Selline vooluimpulss on kontaktoritele hävitava toimega. Juba mõne lülitustsükli järel võivad kontaktori kontaktid kokku kleepuda (keevituda) ning automaatne kondensaatorseade muutub avariiliseks. Lülituse siirdeprotsessis tõuseb pinge kondensaatoril üle võrgupinge ja edasi toimuvad sumbuvad võnkumised võrgupinge kõvera ümber. Siirdeprotsess sumbub tavaliselt ühe perioodi vältel. Lülituspinge amplituud ja sumbuvate võnkumiste sagedus, mis on tavaliselt

vahemikus 300...1000 Hz, sõltuvad konkreetse süsteemi parameetritest ja lülitushetkest. Halvim lülitusolukord on, kui võrgupinge ja kondensaatori pinge on vastasfaasis.

Kondensaatori lülitusvoolu piiramiseks kasutatakse järgmisi võimalusi.

- Kondensaatori lülitamine läbi lülitusvoolu piirava drosseli, milleks kasutatakse õhksüdamikuga drosseleid. Drosseli induktiivsus sõltub kondensaatori võimsusest ja võrgu lühisvõimsusest, mille määramiseks on olemas graafikud ja arvutusseosed. Näiteks peab 25 kvar võimsusega kondensaatori lülitamisel 0,4 kV võrku drosseli induktiivsus olema 10...20  $\mu\text{H}$ . Keskpingel (6...10 kV) on drosselite induktiivsus 50...100  $\mu\text{H}$ .
- Kondensaatori lülitamine spetsiaalse kontaktoriga, millel on läbi aktiivtakistite ühendatud veidi enne põhikontakte sulguvad lisakontaktid.
- Filterreaktori (*detuned reactor*) lülitamine kondensaatoriga jadamisi, mis koos moodustavad LC-jadaahela. Selline reaktor piirab oluliselt kondensaatori lülitusvoolu ja kaitseb kondensaatorit kõrgemate harmooniliste voolude eest. Puuduseks on reaktorite võimsuskaod ja materjalimahukus.
- Kondensaatorite sünkroniseeritud lülitamine türistor- või vaakumkontaktoriga. Sünkroniseeritud lülitamise puhul valitakse lülitushetk sellisele momendile, mil pinge hetkväärtus on nullilähedane, [102]. Sel juhul on siirdeprotsessid pinges ja voolus minimaalsed. Türistorkontaktoriga puuduseks on keerukas juhtsüsteem ning kõrge hind. Mõningast kasutamist on need leidnud sageli muutuvate koormuste puhul, näiteks kraanade ajamid.

### 5.13 Kokkuvõtte ja järeldused

- Käesolevas peatükis on analüüsitud kondensaatorseadmete kasutamise eeliseid ja puudusi ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides. Välja on toodud põhilised seosed reaktiivvõimsuse ülekandmisest tingitud võimsuskadude arvutamiseks ning pingeniivo muutuse arvutamise seosed avaldistena ja graafiliselt kondensaatorseadme lülitamisel süsteemi. Pingeniivo muutusi on uuritud avaldiste abil ja ka mõõtetulemuste alusel. Samuti on esitatud meetodika automaatse kondensaatorseadme optimaalse võimsuse määramiseks.
- Kondensaatorseadmete kasutamisel reaktiivvõimsuse kompensatsiooniks on mitmed üldtuntud positiivsed mõjud nii tarbijale kui ka elektrivõrgule – väiksemad võimsuskaod liinides ja trafodes, väiksemad voolud, kõrgem keskmine pinge ja väiksem pingeniivo hajumine ning väiksem reaktiivenergia tarbimine ja vastavalt ka väiksemad elektrikulud ettevõttes.
- Reaktiivvõimsuse kompensatsioon on oluline tegur võimsuskadude vähendamisel liinides ja trafodes. Seetõttu peaks reaktiivvõimsuse tegur  $\tan\varphi$  olema väiksem kui 0,3 (vastavalt  $\cos\varphi$  üle 0,95), sel juhul on võimsuskaod reaktiivvõimsuse ülekandmisest liinides ja trafodes alla 10% koguvõimsuskadudest.
- Kondensaatorseadme võimsuse valiku analüüs näitab, et seadme võimsusel on teatud optimaalne suurus. Optimaalne võimsus ja astmete arv tuleks valida

vastavalt tegelikele reaktiivvõimsuse koormusgraafikutele ja soovitavale reaktiivvõimsuse tegurile  $\tan\varphi$ . Soovitav reaktiivvõimsuse tegur on näiteks  $\tan\varphi = 0,15$  ( $\cos\varphi = 0,99$ ) või  $\tan\varphi = 0,2$  ( $\cos\varphi = 0,98$ ).

- Kondensaatorseadmete kasutamisega seotud võimalikud negatiivsed kaasmõjud on vähem tuntud. Nende mõjude hindamiseks on vajalik elektrisüsteemi talitluse analüüs kas juba enne kondensaatorseadmete paigaldamist või olemasoleva seadme puhul kahes talitluses – ilma kondensaatorseadmeta ja koos kondensaatorseadmega. Kui neid negatiivseid mõjusid ei arvestata, võib tulemuseks olla olukord, kus ettevõtte elektrikulud kompensatsiooniga mitte ei vähene, vaid hoopis suurenevad. Lisaks on võimalik elektrisüsteemi talitus kõrge harmooniliste taseme juures nii voolus kui ka pinges või talitus isegi paralleelresonantsi tingimustes. See on elektriseadmetele kahjulik ja suurendab võimsuskadusid.
- Käesolevas töös on jõutud seisukohale, et kondensaatorseadmete kasutamisel tuleb tingimata arvestada pingeniivoo tõusu ning voolu ja pinge harmooniliste moonutuste suurenemise mõju tarbitavale võimsusele, võimsuskadudele, elektritarbimisele ning seadmetele. Seda on võimalik teha analüütiliselt või katselisel teel mõõtmistega sel juhul, kui kondensaatorseadmed on juba paigaldatud. Pingeniivoo tõus on tavaliselt 2...3%, aga vahel ka kuni 5% sõltuvalt koormuse iseloomust, trafo lühispingest ja harmooniliste tasemest süsteemis. Harmooniliste moonutuste tase voolus ja pinges tõuseb kondensaatorite lülitamisel süsteemi alati, kui ei kasutata filterreaktoreid. See tõus on tavaliselt voolu moonutusteguris  $THD_i$  2...6 kordne ja pinge moonutusteguris  $THD_u$  1,2...2 kordne.
- Automaatse kondensaatorseadme koosteosade valikul tuleb seadme pikaajalise tõrketu töö tagamiseks arvestada kondensaatorite nimipinge ja kontaktorite nimivoolu valikul piisavate varuteguritega. Kondensaatorseade töötab sageli kestvalt oma nimikoormusel või ka üle selle ning seadme võimsuskaod võivad olla oluliselt suuremad kui nimitingimustel. Moonutatud pingekõveraga elektrisüsteemis on näiteks võimsuskaod kondensaatorites 2...3 korda suuremad kui siinuspinge korral.

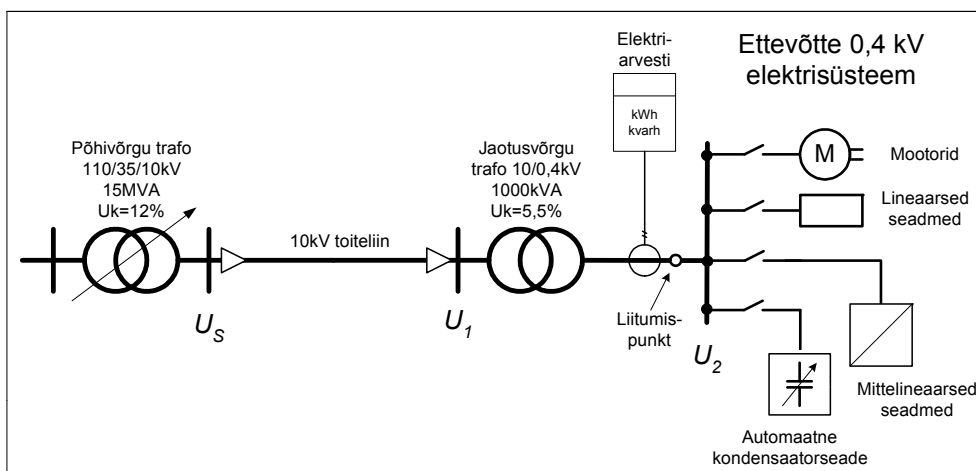
## 6 Harmoonilised voolud ja pinged 0,4 kV elektrisüsteemides, ettevõtte elektrisüsteemi mudel voolude ja pingete arvutamiseks

### 6.1 Ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteem ja selle aseskeemi parameetrid

Ettevõtte elektrisüsteemi talitlust ja parameetreid mõjutavad kolm alltoodud tegurite gruppi.

- Ettevõtte elektrisüsteemi tarvitite koormused (koormusvoolu suurus ja nende muutumise iseloom, voolukõverate kuju ja faasivoolude sümmeetria) – sh nii lineaarsed kui ka mittelineaarsed koormused.
- Elektrisüsteemi (toiteahela) ekvivalentne näivtakistus (*mains impedance, system impedance*), mis on erinevatel harmoonilistel sagedustel erinev ning samuti ajas muutuv parameeter ning sõltub süsteemi toitetrast, süsteemi lülitatud kondensaatorite arvust, filtritest ja süsteemi koormuste näivtakistusest.
- Keskpinge jaotusvõrgu toitepinge parameetrid trafo primaarpoolel, näiteks pinge suurus, pingelohud, pingete sümmeetria kolmes faasis ja pingekõvera kuju moonutused, seega ka teiste antud võrgupiirkonna tarbijate lineaarsed ja mittelineaarsed koormused ning lisaks veel loodusnähtused ja avariid.

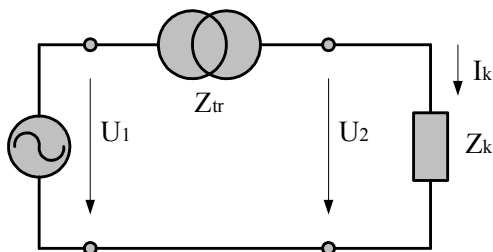
Toitepinge kvaliteedi parameetrid, võimsuskao süsteemis ja elektriseadmete võimalikud ülekoormused on määratud nende tegurite koosmõjuga. Ettevõtte 0,4 kV elektrisüsteem ja selle toiteahel alates põhivõrgust on toodud joonisel 6.1.



Joonis 6.1. Ettevõtte 0,4 kV elektrisüsteem ja toiteahel alates põhivõrgust

Praktikas on erinevate seadmete arv ettevõtte elektrisüsteemis suur ja nende kõigi parameetreid arvesse võtta pole võimalik. Seetõttu on vaja lihtsat aseskeemi, mis võimaldaks arvutada süsteemi koostisosade pinget ja voolu erinevates koormus-

olukordades ja erineva harmooniliste voolude taseme ja spektri puhul. Ettevõtte elektrisüsteemi koos toiteallikaga võib kõige lihtsamal juhul, kui süsteemis puuduvad harmooniliste voolude allikad ja ka kondensaatorid, vaadelda koosnevana aktiiv-induktiivsest koormusest näivtakistusega  $Z_k$  ja trafost näivtakistusega  $Z_{tr}$ . Ettevõtte elektrisüsteemi aseseemi võib sel juhul kujutada nii nagu joonisel 6.2, kus toiteahela (trafo) näivtakistus on jadamisi koormustakistuse ja pingevalikaga.



Joonis 6.2. Ettevõtte elektrisüsteemi aseseem lihtsaimal kujul

Toiteahela näivtakistus sisaldab endas toiteahela kõigi koostisosade näivtakistuste summat (trafod, liinid, lülitid, sularid), millest suurima osakaaluga on jaotusvõrgu viimase astme toitetrafo, tavaliselt pingel 10/0,4 kV ja võimsusega 50...1000 kVA. Probleeme võib esineda mõlemal juhul, nii siis, kui toiteahela näivtakistus on liiga kõrge kui ka siis, kui see on liiga madal. Tavaliselt põhjustab probleeme liiga suur näivtakistus, [22, 89]. Sel juhul tekitavad koormusvoolu kõikumised suuri pingekõikumisi ja koormusvoolu järsud suurenemised (impulsid) pingelohkusi, samuti põhjustavad voolukõvera kaju moonutused pingekõvera kaju moonutusi.

Madala näivtakistuse puhul võivad esineda suured käivitusvoolud ja lühisvoolud. Halvemal juhul võib esineda olukord, kus kaitselüliti lahutusvõime on väiksem kui tekiv lühisvool või mootorite käivitusvool. Praktikas on esinenud näiteks juhtum, kus kahe võimsa külmutuskompressori (á 315 kW) üheaegse käivituse ajal rakendus lühisvoolu kaitse ning kaitselüliti hävis kaarleegis. Eksituse tõttu käivitus kaks kompressori mootorit samaaegselt ja tagajärjeks oli pikaajaline toitekatkestus.

Toiteahela (trafo) näivtakistuse  $Z_{tr}$  põhisagedusel saab määrata lihtsa mõõtmisega, kus samal hetkel registreeritakse voolu  $I_k$  ja pinge  $U_2$  muutused tarbija liitumispunktis. Sel juhul:

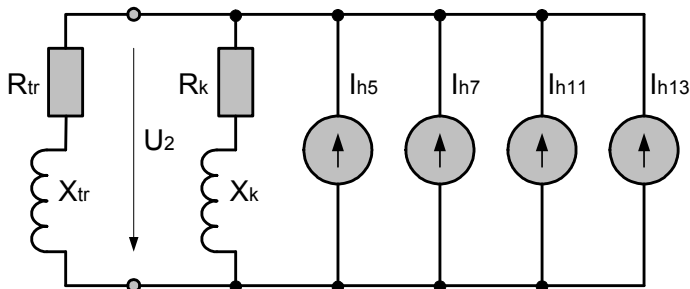
$$Z_{tr} = \Delta U_2 / \Delta I_k$$

Mõõtetulemus on piisavalt täpne, kui pingemuutus on piisavalt suur, näiteks võimsate mootorite käivituse ajal, kondensaatorseadme lülitamise hetkel või mingi võimsa elektriseadme sisselülitamise hetkel, [89].

Reaalses elektrisüsteemis on osa tarbijatest mittelineaarse voolu-pingetunnusjoonega. Kui näiteks lahutame elektrisüsteemi koosnevaks ainult jadähenduses ja rööpühenduses komponentidest, siis enamus mittelineaarsetest komponentidest on just rööpühenduses. Mittelineaarset tarbijat võib kõrgematel harmoonilistel sagedustel seega vaadelda kui rööpühenduses vooluallikaid elektrisüsteemis, [22].



Vaadeldes koormuse põhjustatud pingemuutusi ja harmoonilisi pingeid on tarbija koormus  $Z_k$  askeemis rööbiti trafo näivtakistusega  $Z_{tr}$ . Harmooniliste voolude ja pingete arvutamisel eeldatakse, et harmoonilised voolud sulguvad läbi trafo ja koormuse, nagu on näidatud joonisel 6.3.



Joonis 6.3. Elektrisüsteemi askeem trafo, koormuse ja erinevate harmooniliste vooluallikatega

Harmoonilised voolud toiteahelas tekitavad mittesiinuselise pingelangu trafo näivtakistusel ning seega on ka tarbija toitepinge  $U_2$  mittesiinuseline ehk moonutatud. Harmoonilised voolud süsteemis saab määrata voolu mõõtmistega vastavatel sagedustel. Kui vooluharmooniliste mõõteandmed puuduvad, siis soovitatakse lähtuda sellest, et harmoonilise voolu väärtus on pöördvõrdeline tema järguga, st näiteks 5-nda harmoonilise vool on 20% põhisageduslikust voolust, 7-nda harmoonilise vool 13%, 11-nda harmoonilise vool 9% jne. See annab 6-pulsilistele muunduritele iseloomuliku harmooniliste voolude spektri, kus arvesse võetakse harmoonilised järguga 5, 7, 11, 13, 17, 19 ja 23. Sellest kõrgemate harmooniliste osakaal on enamasti väike.

Trafo ja koormuse näivtakistuse arvutamisel askeemis arvestatakse, et aktiiv- ja induktiivtakistused sõltuvad harmoonilise järgust  $h$ . Harmoonilisel sagedusel  $h$  on tarbija koormuse ekvivalentne näivtakistus  $Z_{k,h}$  suurem kui põhisagedusel, [106]:

$$Z_{k,h} = \sqrt{h \left( \frac{U_{nimi}^2}{\sqrt{3} \cdot P_k} \right)^2 + \left( h \frac{U_{nimi}^2}{\sqrt{3} \cdot Q_k} \right)^2}, \quad (6.1)$$

kus  $P_k$  ja  $Q_k$  on vastavalt koormuse aktiiv- ja reaktiivvõimsus.

Harmooniliste vooluallikate poolt vaadates on koormusega rööbiti trafo näivtakistus  $Z_{tr}$ , mis sarnaselt eelnevale on samuti aktiiv-induktiivne:

$$Z_{tr,h} = \sqrt{h R_{tr}^2 + (h X_{tr})^2}. \quad (6.2)$$

Seega suurenevad põhisagedusest kõrgematel sagedustel nii liinide, trafode kui ka tarbija aktiiv-induktiivkoormuste ekvivalentsed näivtakistused.

Trafo aktiivtakistuse  $R_{tr}$  ja induktiivtakistuse  $X_{tr}$  põhisagedusel saame arvutada üldtuntud seostest:

$$R_{tr} = \frac{\Delta P_k \cdot U_{nimi}^2}{S_{nimi}^2}, \quad (6.3)$$

$$X_{tr} = \frac{u_k \cdot U_{nimi}^2}{S_{nimi}}, \quad (6.4)$$

kus  $\Delta P_k$  – trafo lühiskaod, (kW);

$U_{nimi}$  – trafo primaarpoole nimiliinipinge, (kV);

$S_{nimi}$  – trafo nimivõimsus (3 faasi summaarne võimsus), (kVA);

$u_k$  – trafo suhteline lühispinge.

Arvutades avaldistest 6.3 ja 6.4 ettevõtetes sagedasti kasutatava trafo TM-1000/10 aseseemi parameetrid 0,4 kV poolel, saame:

$$R_{tr(1)} = 0,0088 \Omega; X_{tr(1)} = 0,0022 \Omega.$$

Arvutades sama trafo aseseemi parameetrid 10 kV poolel, saame:

$$R_{tr(2)} = 0,15 \Omega; X_{tr(2)} = 5,5 \Omega.$$

Trafo takistuste arvutamisel on oluline, kas need taandatakse trafo primaar- või sekundaarpoolele. Eesti ettevõtetes enamkasutatavate 10/0,4 kV trafode parameetrid on toodud tabelis 6.1.

Tabel 6.1. Ettevõtetes enamkasutatavate 10/0,4 kV trafode parameetrid põhisagedusel

Trafo kVA/kV	Tühijooksu- kaod $P_0$ (kW)	Koormus- kaod $P_k$ (kW)	Lühis- pinge $U_k$ (%)	Aktiivtakistus 0,4 kV poolel $R_{tr}$	Reaktiivtakistus 0,4 kV poolel $X_{tr}$
TM 250/10	0,82	3,7	4,5	0,010	0,027
TM 400/10	1,05	5,5	4,5	0,0055	0,017
TM 630/10	1,56	8,5	5,5	0,0031	0,0136
TM 1000/10	2,45	12,2	5,5	0,0022	0,0088
TM 1600/10	2,80	18,0	5,5	0,0011	0,0034

Ülaltoodu kokkuvõtteks saame öelda järgmist:

- süsteemi ekvivalentne takistus mingil harmoonilisel sagedusel sõltub peamiselt trafo näivtakistusest ja seega trafo nimivõimsusest, kusjuures trafo induktiivtakistus on 3...5 korda suurem kui aktiivtakistus;
- koormustakistuse mõju süsteemi ekvivalentsele jadatakistusele on väike, kuna koormuse näivtakistus on alla 10% trafo näivtakistusest; ekvivalentses takistuses domineerib lähima alajaama trafo näivtakistus;
- kõrgematel sagedustel on trafo näivtakistus suurem ja seega tekitab tarbija põhjustatud kõrgem vooluharmooniline ka suurema pingeharmoonilise.

## 6.2 Ettevõtte elektrisüsteemi ekvivalentne näivtakistus ja sageduskarakteristik

Elektrisüsteemi talitluse analüüsimisel on kasulik uurida kas süsteemi ekvivalentse näivtakistuse sagedussõltuvust (*frequency scan*) või ka süsteemi mahtuvussõltuvust (*capacitance scan*), [30]. Kuna praktikas on võimalik just kondensaatorseadme võimsuse astmesuursi valida, siis näitab mahtuvussõltuvus ära need võimsused, mille juures võib antud süsteemis ja antud sagedusel esineda resonantsiolukord. Sel juhul on võimalik kas reaktiivvõimsuse regulaatori juhtalgoritmi seadistades või sobivalt astmete suurusi valides neid olukordi vältida.

Elektrisüsteemi ekvivalentse näivtakistuse sõltuvust sagedusest või harmoonilise järgust nimetatakse elektrisüsteemi sageduskarakteristikuks. Teades süsteemi koostisosade – toitetrafo, koormuse ja kondensaatorite parameetreid, saab arvutada süsteemi asesseskeemi ekvivalentse näivtakistuse  $Z_{ekv}$  sõltuvuse harmooniliste järgust  $h$ . Näivtakistuse sõltuvust sagedusest on ülevaatlik esitada graafiliselt, kusjuures  $Z_{ekv}$  võib olla esitatud kas absoluutväärtusena  $Z_{ekv}(\Omega)$  või suhtarvuna  $Z_{ekv}^*$  näivtakistusse kas põhisagedusel või samal harmoonilisel sagedusel:

$$Z_{ekv,1}^* = \frac{Z_{hC}}{Z_1} \quad \text{või} \quad Z_{ekv,2}^* = \frac{Z_{hC}}{Z_h}, \quad (6.5)$$

kus  $Z_{hC}$  – ahela näivtakistus harmoonilisel sagedusel  $h$  koos kondensaatoritega;

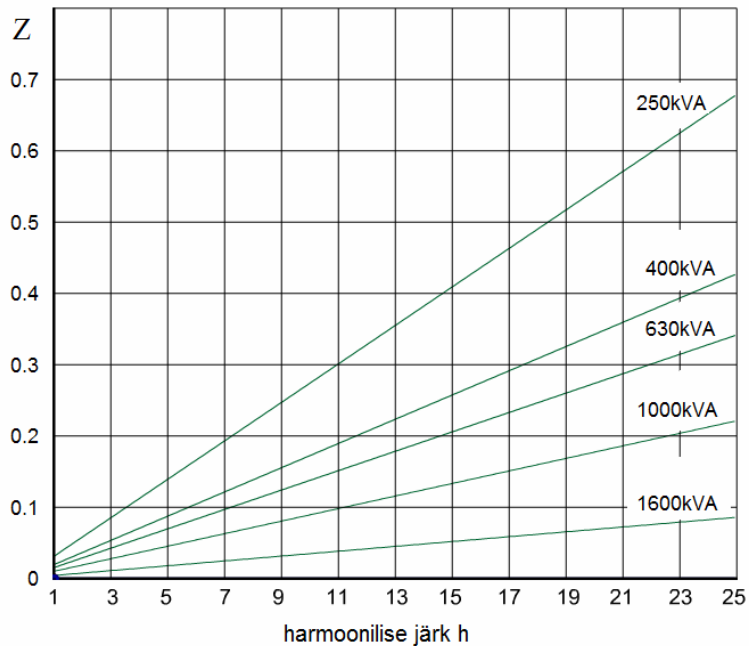
$Z_1$  – ahela näivtakistus põhisagedusel;

$Z_h$  – ahela näivtakistus harmoonilisel sagedusel.

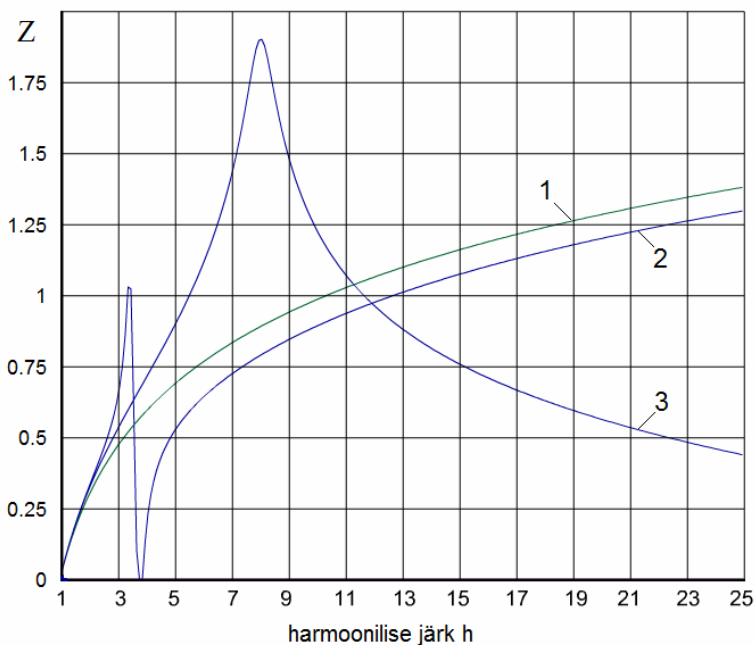
Elektrisüsteemi sageduskarakteristiku uurimine on oluline, kui tarbitavas voolus ja pinges on arvestatav harmooniliste tase ning on oht resonantsiolukordade tekkeks. Trafo näivtakistus on ligikaudu lineaarses sõltuvuses sagedusest ja sõltub trafo võimsusest. Erineva võimsusega trafode näivtakistused sõltuvalt harmoonilisest sagedusest on toodud joonisel 6.4.

Kondensaatorite lülitamisel süsteemi ei ole näivtakistuse sõltuvus enam lineaarne. Kondensaator muudab sageduskarakteristikut tunduvalt, trafo induktiivsuse ja kondensaatori paralleelresonantsi piirkonnas suureneb näivtakistus kuni 5 korda, kõrgematel sagedustel aga väheneb. Näivtakistuse kõveras ilmuvad maksimumid, nagu näidatud joonisel 6.5. Mida suurem on sisselülitatud kondensaatorite koguvõimsus, seda madalam on resonantssagedus. Resonantssagedusest kõrgematel sagedustel on kondensaatori takistus väike ja harmoonilised voolud sulguvad kondensaatorites.

Kui kondensaator on lülitatud süsteemi koos reaktoriga passiivfiltrina, siis on sageduskarakteristik erinev. Filtri resonantssagedusel on ekvivalentne takistus väga väike, sellest kõrgematel sagedustel suureneb. Filtri resonantssagedusel väheneb näivtakistus miinimumini ja harmoonilised voolud selles sageduspiirkonnas sulguvad filtris, kõrgetel sagedustel on passiivfilter suure takistusega.



Joonis 6.4. Trafo näivtakistuse  $Z(\Omega)$  sõltuvus harmoonilise järgust  $h$ , erineva nimivõimsusega trafod



Joonis 6.5. Elektrisüsteemi sagedusarakteristikud, erinevad elektrisüsteemid: 1 – trafo koormusega; 2 – trafo koormuse ja passiivfiltriga; 3 – trafo koormuse ja kondensaatoriga; näivtakistus  $Z$  on suhtena põhisageduslikku näivtakistusse  $Z_{h1}$  logaritmilises skaalas

### 6.3 Paralleelresonants ettevõtte 0,4 kV elektrisüsteemis

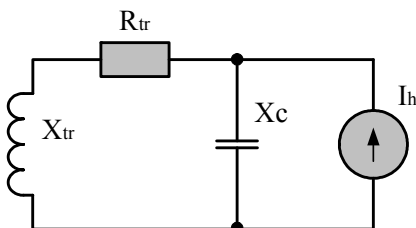
Elektrisüsteemis moodustavad harmooniliste voolude allikas, trafo induktiivsus ja kondensaatori mahtuvus paralleelahela, milles võib esineda paralleelresonants. Resonantssageduse arvutamiseks sobib lihtne aseskeem, mis koosneb ainult trafo induktiiv- ja aktiivtakistusest ja kondensaatori mahtuvustakistusest, vt joonis 6.6. Resonantssagedus sellises paralleelahelas väljendub trafo puisteinduktiivsuse  $L$ , trafo aktiivtakistuse  $R$  ja kondensaatori mahtuvuse  $C$  kaudu järgmiselt:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{L/C - R^2}{L/C}}. \quad (6.6)$$

Sellise ahela näivtakistuse saame arvutada järgmisest seosest, [22]:

$$Z = \frac{R + j\omega L}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC}. \quad (6.7)$$

Kui rööpahela omavõnkesagedus langeb kokku vooluharmoniliste allika sagedusega, siis voolud sellel sagedusel võimenduvad. Harmooniliste voolude allikad on enamasti 0,4 kV pingel ja seega kondensaatoritega rööplülituses. Rööpresonants on probleemiks, kui süsteemis on suured harmoonilised voolud. Sel juhul astmekaupa kondensaatorseadme võimsust suurendades esineb olukordi, kus resonantssagedus langeb kokku harmoonilise vooluallika sagedusega.



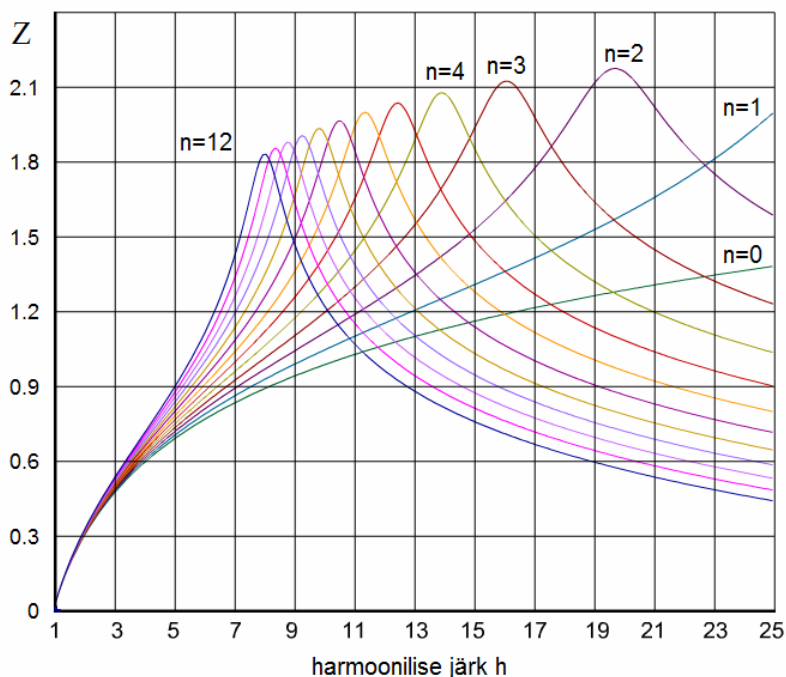
Joonis 6.6. Rööpresonants trafo, kondensaatori ja harmooniliste vooluallika aseskeemis

Sagedusel, mille juures  $X_{tr} = X_C$ , on näivtakistuse maksimum. Kuna ahela näivtakistus on suur, siis tekib resonantssagedusel ka suur harmooniline pinge. Näivtakistuse sageduskarakteristikud erineva kondensaatorite arvu korral on toodud joonisel 6.7.

Arvutades ahela ekvivalentse näivtakistuse sõltuvuse sagedusest antud trafo ja kondensaatori parameetritega, saame graafikud, kus  $Z_{ekv}$  on maksimaalne resonants-sagedusel. Arvutustes võib lähtuda trafo induktiiv- ja kondensaatori mahtuvustakistusest, sel juhul:

$$f_{res} = f_1 \sqrt{\frac{X_C}{X_{tr}}}, \quad (6.8)$$

kus  $X_C$  on kondensaatori mahtuvustakistus ja  $X_{tr}$  – trafo induktiivtakistus.



Joonis 6.7. Rööpresonants süsteemis trafo–kondensaatorpatarei erineva kondensaatorite arvu  $n$  korral, ekvivalentne näivtakistus  $Z$  on oomides logaritmilises skaalas

Praktilistes arvutustes on mugavam resonantssagedust arvutada lähtudes trafo ja kondensaatorseadme võimsusest ning trafo lühispingest järgmise seosega:

$$f_{res} = f_1 \sqrt{\frac{S_{nimi}}{Q_C \cdot u_k}}, \quad (6.9)$$

kus  $S$  – trafo näivvõimsus, kVA;

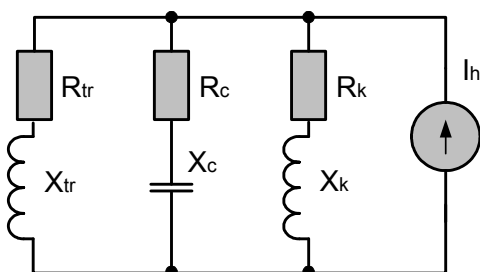
$u_k$  – trafo lühispinge, enamasti  $u_k = 0,05 \dots 0,06$ ;

$Q_C$  – kondensaatorite summaarne võimsus, kvar;

$f_1$  – võrgu põhisagedus.

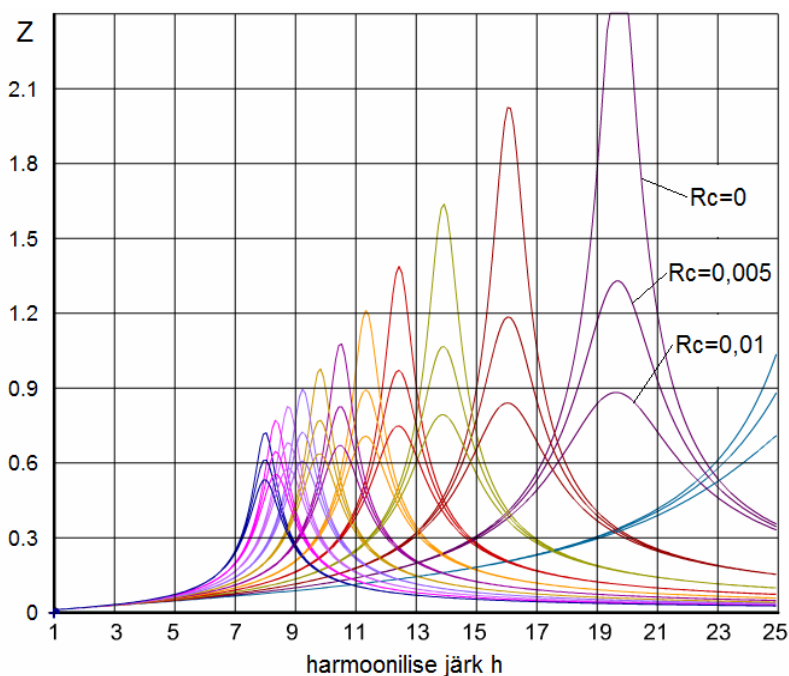
Arvutades resonantssagedused ahelas, kus trafo võimsus on 1000 kVA ja kondensaatori võimsused on 100 kvar, 200 kvar ja 300 kvar, saame vastavalt  $f_{res,100} = 13,5f_1$ ;  $f_{res,200} = 9,5f_1$  ja  $f_{res,300} = 7,8f_1$ . Mida suurem on kondensaatori võimsus, seda madalam on ahela resonantssagedus.

Juhul, kui võtame arvesse aktiivtakistused nii trafos kui ka kondensaatoriahelas ning samuti koormuse aktiiv- ja induktiivtakistuse, on askeem selline nagu joonisel 6.8. Resonantsi sumbumist mõjutavad oluliselt aktiivtakistused trafos ja kondensaatoriahelas, vt joonis 6.9. Kondensaatoriahelas esineb aktiivtakistus ühendusjuhtmetes, kontaktoris ja sularites ning nagu selgub erineva  $R_C$  väärtusega kõverate võrdlemisel, on sellel suur mõju.



Joonis 6.8. Aseskeem trafo, koormuse ja kondensaatoriga ning harmooniliste volude allikaga

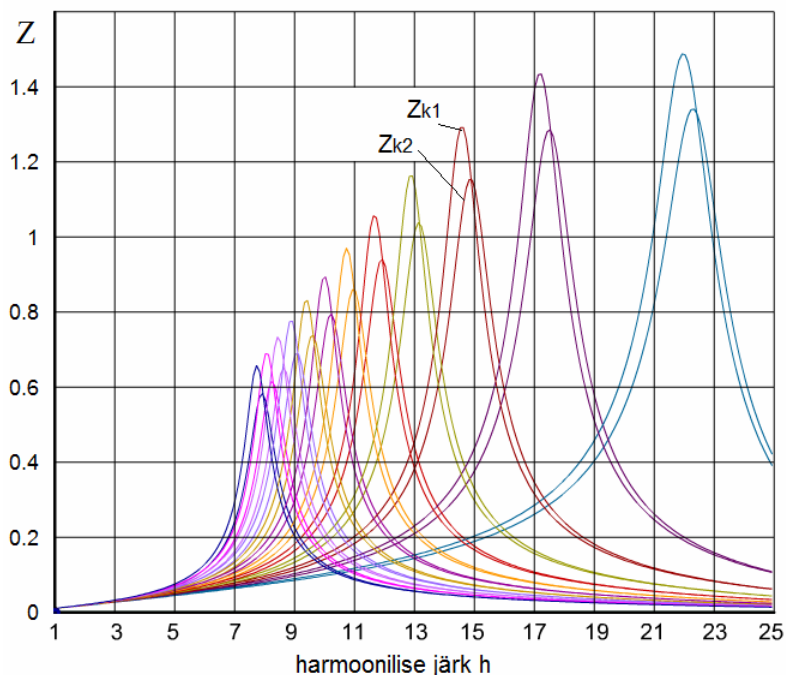
Tegelikuses esineb niisugune olukord, kus trafo madalpinge poolele oleks lülitatud ainult kondensaator ilma muu koormuseta (näiteks mootoriteta), harva. Koormus mõjutab samuti näivtakistuse karakteristikuid. Nii näiteks nihutavad mootorid resonantssagedust veidi kõrgemale, kuna summaarne induktiivsus väheneb. Mootorid suurendavad ka sumbumist, kuna lühisrootori ahela takistuste suhe  $X/R$  on väike [22]. Koormust arvestades muutuvad veidi resonantssagedused ja muutub ka resonantsi ulatus, nagu selgub jooniselt 6.10.



Joonis 6.9. Kondensaatoriahela aktiivtakistuse  $R_c$  ( $\Omega$ ) mõju aseskeemi näivtakistuse sageduskarakteristikutele

Aktiivtakistuste olemasolu koormuses, trafos ja kondensaatori ahelas vähendab resonantsi mõju tunduvalt, seepärast esineb kondensaatorite ja trafode avariilisi riknemisi õnneks harva. Siiski tuleb ettevaatlik olla suure võimsusega konden-

saatorseadmete paigaldamisel elektrisüsteemi eesmärgiga ideaalset võimsustegurit  $PF=1,0$  saavutada, kuna sel juhul langeb resonantssagedus liiga madalale (kuni 5-nda harmoonilise sageduseni).



Joonis 6.10. Erinevast koormustakistusest tingitud näivtakistuse kõverate muutused; koormuse näivtakistuse variandid on:  $Z_{k1} = (0,52 + j 0,52) \Omega$ ;  $Z_{k2} = (0,13 + j 0,13) \Omega$

## 6.4 Voolu ja pinge harmooniliste spektrite ja resonantside uurimine elektrisüsteemides, mis sisaldavad kondensaatoreid

Resonantside ja harmooniliste probleem kerkib ettevõtetes esile tavaliselt seoses reaktiivvõimsuse kompensatsiooniga. Tarbija huvides on vähendada reaktiivenergia kulusid miinimumini, selleks tuleb süsteemi lülitada selline arv kondensaatoreid, et nende koguvõimsus oleks võrdne reaktiivvõimsuse tarbimisega.

Praktikas ei ole mitte alati võimalik lülitada ettevõtte elektrisüsteemi sellisel hulgal kondensaatoreid, et reaktiivvõimsuse täieliku kompensatsioon oleks tagatud igal ajavahemikul. Põhjuseks on asjaolu, et kondensaatorite lülitamisega süsteemi muutub oluliselt süsteemi näivtakistus erinevatel harmoonilistel sagedustel ning harmooniliste moonutuste tase trafo toitevoolus ja ka toitepinges tõuseb. Põhisagedusest kõrgematel sagedustel süsteemi näivtakistus algul kasvab teatud maksimumini ja hakkab seejärel vähenema, nagu näidatud joonisel 6.5.

Koormusvoolus esinevad sagedamini 5-s, 7-s, 11-s, 13-s, 17-s, 19-s ja 23-s vooluharmooniline, mis on iseloomulikud koormustele, kus kasutatakse enam sagedusmuundureid. Kuna kondensaatorite lülitamisega elektrisüsteemi näivtakistus teatud



sageduste piirkonnas tõuseb, siis suurenevad ka harmoonilised moonutused toitepinges ja voolus. Kui see suurenemine on mõõdukas, saab kondensaatoreid kasutada ilma filterreaktoriteta, kui aga harmooniliste moonutuste kasv voolus on näiteks 2...3 kordne või suurem, siis toob kondensaatorite lülitamine süsteemi kaasa märgatavad lisavõimsuskao ja voolu- ning pingemoonutused, mille kahjulik mõju võib olla suurem kui reaktiivvõimsuse kompensatsioonist saadav sääst. Kondensaatorite võimsuse valikul ettevõtte elektrisüsteemis tuleks seetõttu vältida seadme selliseid parameetreid, mille juures resonantssagedus langeks kokku mõne domineeriva harmoonilise sagedusega, tavaliselt on sellisteks 5-s, 7-s, 11-s ja 17-s harmooniline.

Harmooniliste voolude ja pingete spektrite ning vooluresonantside uurimiseks ja iseloomustamiseks on käesolevas töös valitud kolm erineva harmooniliste moonutuste tasemega iseloomulikku näidet 0,4 kV elektrisüsteemiga tööstusettevõtetest, millest esimeses on madal harmooniliste tase, teises keskmine ja kolmandas kõrge tase. Need kolm uuritud elektrisüsteemi on ettevõtetes Finnforest Eesti OÜ, Draka Cables AS ja Haka Plast OÜ. Finnforest Eesti on puidutöötlemisettevõtte, kus harmooniliste tase on stabiilne ja madal, Draka Cables on kaablite tootmisettevõtte, kus harmooniliste tase on keskmine, ja Haka Plast on polüetüleentorude tootmisettevõtte, kus harmooniliste tase on kõrge. Voolu- ja pinge harmooniliste spektrite registreerivad mõõtmised on läbi viidud võrguanalüsaatoritega FLUKE 434 ja Memobox 300. Järgmistes punktides on esitatud harmooniliste voolude, pingete ja resonantsiolukordade uurimistulemused valitud kolmes elektrisüsteemis.

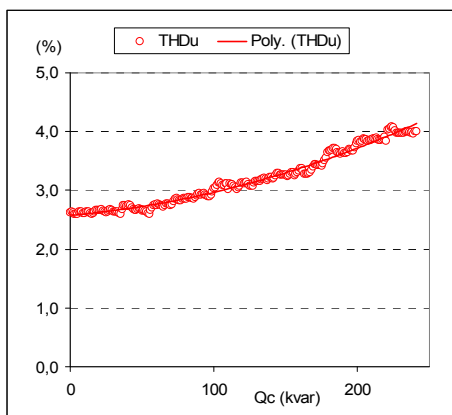
#### **6.4.1 Harmooniliste voolude, pingete ja resonantsitingimuste mõõtetulemused moonutuste madala taseme korral**

Harmooniliste moonutuste taset voolus ja pinges võib tinglikult nimetada madalaks juhul, kui elektrisüsteemi üheski tavapäraselt esinevas talitluses ei teki elektri-seadmeid kahjustavaid või olulisi lisakadusid põhjustavaid harmoonilisi pingeid ja voolusid. Reaktiivvõimsuse kompensatsiooniks on sel juhul võimalik kasutada kondensaatoreid ilma filterreaktoriteta. Tavaliselt on harmooniliste moonutuste tase sel juhul pinges  $THD_u < 2...4\%$  ja voolus  $THD_i < 5...10\%$ .

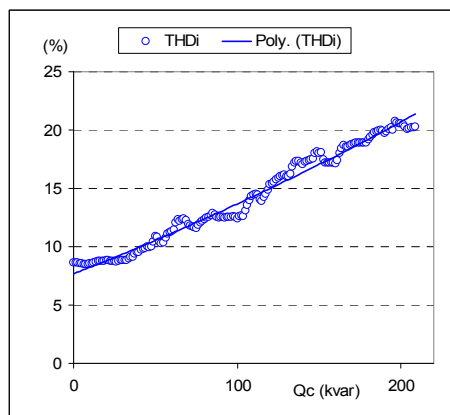
Mõõtmised ja katsed on läbi viidud ettevõttes Finnforest Eesti OÜ, kus trafo nimivõimsus on 630 kVA, tarbijateks on puidutööstuse seadmete ajamid ja asünkroonmootorid, mittelineaarsete seadmete osa on väike. Kondensaatorseadme koguvõimsus on 210 kvar, kondensaatorseade on 10-astmeline astme suurusega 21 kvar, filterreaktorid puuduvad. Kõigepealt on joonistel 6.11 ja 6.12 toodud trafo voolu ja pinge harmooniliste moonutuste  $THD$  tase sõltuvalt sisselülitatud kondensaatorite arvust ja seega kondensaatorite koguvõimsusest. Graafikute iga punkt vastab  $THD$  keskmisele 1 s väärtusele, pidevjoonega on näidatud andmetele vastav trendijoon.

Järjestikku kondensaatoreid sisse lülitades kasvab harmooniliste moonutuste tase pinges alates ca 2,5-st kuni ca 4 protsendini ja voolu harmooniliste moonutuste tase alates ca 8-st kuni ca 20 protsendini. Joonistelt 6.11 ja 6.12 selgub, et pinge ja voolu

kogumoonutused kasvavad kondensaatorite sisselülitamisel ligikaudu lineaarselt. Pinge moonutused jäävad tasemele ca 4% ka sel juhul, kui reaktiivvõimsus on täielikult kompenseeritud ehk  $\cos\varphi=1,0$ . Joonistelt 6.11 ja 6.12 selgub, et pinge ja voolu kogumoonutused kasvavad kondensaatorite sisselülitamisel ligikaudu lineaarselt.



Joonis 6.11. Trafo pinge harmooniliste moonutuste  $THD_u$  (%) muutus kondensaatorite sisselülitamisel madala harmooniliste taseme korral



Joonis 6.12. Trafo voolu harmooniliste moonutuste  $THD_i$  (%) muutus kondensaatorite sisselülitamisel madala harmooniliste taseme korral

Joonistel 6.13 kuni 6.16 on toodud voolude ja pingete harmooniliste spektrid ilma kondensaatorseadmata ja koos kondensaatorseadmega ning kondensaatorseadme erinevatel astmetel ehk erineva koguvõimsuse  $Q_C$  juures. Joonistelt selgub, et vooluharmoniliste tase ilma kondensaatorseadmata on vahemikus 8...10% ja koos sisselülitatud kondensaatoritega 19...21%.

HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N
THD% <sub>r</sub>	8.7	9.8	9.3	92.5
H3% <sub>r</sub>	1.2	1.1	1.8	2.4
H5% <sub>r</sub>	7.9	8.9	8.4	2.4
H7% <sub>r</sub>	2.3	2.8	2.6	2.1
H11% <sub>r</sub>	1.3	1.5	1.3	2.0
H13% <sub>r</sub>	1.3	1.2	1.1	2.0
H17% <sub>r</sub>	0.7	1.0	0.8	2.2
H19% <sub>r</sub>	0.8	0.8	0.7	2.3

04/20/11 12:21:34 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160  
 U<sub>r</sub> W BACK TREND HOLD RUN

Joonis 6.13. Trafo harmooniliste voolude spekter, kondensaatorid on välja lülitatud, voolus domineerib 5-s harmooniline

HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N
THD% <sub>r</sub>	19.3	21.2	20.0	94.5
H3% <sub>r</sub>	0.6	1.7	2.5	2.0
H5% <sub>r</sub>	19.1	20.9	19.7	2.0
H7% <sub>r</sub>	2.4	2.4	1.8	2.1
H11% <sub>r</sub>	0.7	1.2	1.2	2.0
H13% <sub>r</sub>	0.4	0.6	0.5	2.0
H17% <sub>r</sub>	0.2	0.3	0.2	2.0
H19% <sub>r</sub>	0.3	0.3	0.2	2.1

04/20/11 12:24:44 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160  
 U<sub>r</sub> W BACK TREND HOLD RUN

Joonis 6.14. Trafo harmooniliste voolude spekter, kondensaatorid on sisse lülitatud,  $Q_C=210$  kvar, domineerib 5-s harmooniline

HARMONICS TABLE				
Volt	L1	L2	L3	N
THD% <sub>r</sub>	2.1	2.0	2.1	71.4
H3% <sub>r</sub>	0.8	0.7	0.7	54.7
H5% <sub>r</sub>	1.7	1.5	1.8	16.2
H7% <sub>r</sub>	0.4	0.4	0.4	7.6
H11% <sub>r</sub>	0.3	0.2	0.3	3.9
H13% <sub>r</sub>	0.5	0.5	0.4	7.9
H17% <sub>r</sub>	0.3	0.4	0.3	8.6
H19% <sub>r</sub>	0.4	0.4	0.4	5.9

04/13/11 11:26:54 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160

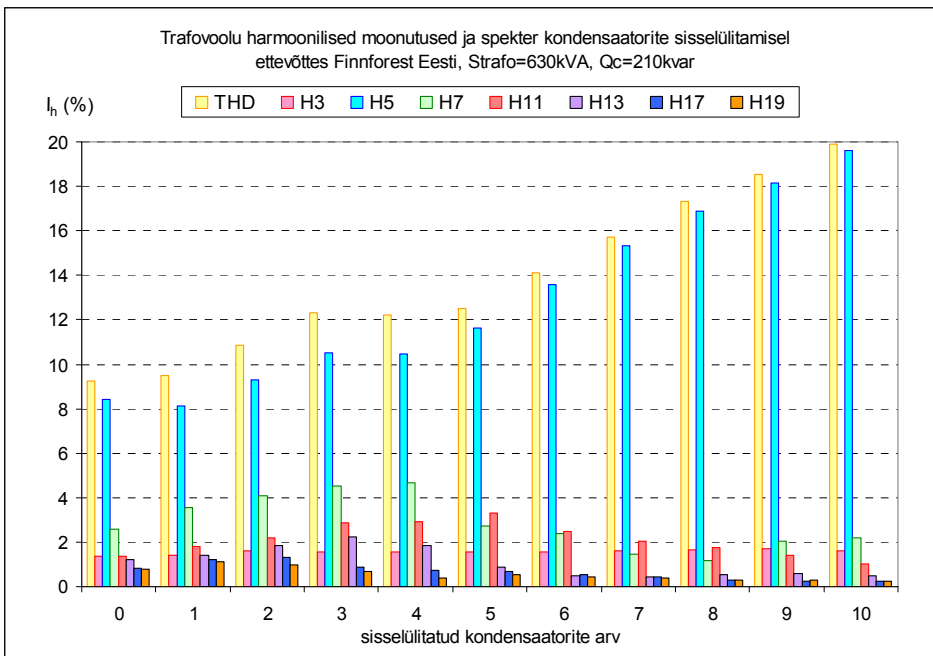
Joonis 6.15. Trafo faasipingete harmooniliste spekter, kondensaatorid on välja lülitatud, harmooniliste tase on madal

HARMONICS TABLE				
Volt	L1	L2	L3	N
THD% <sub>r</sub>	4.0	3.9	4.0	98.9
H3% <sub>r</sub>	1.0	1.0	1.1	79.6
H5% <sub>r</sub>	3.7	3.4	3.7	18.8
H7% <sub>r</sub>	0.9	1.4	0.7	19.4
H11% <sub>r</sub>	0.6	0.5	0.5	7.5
H13% <sub>r</sub>	0.2	0.1	0.1	7.9
H17% <sub>r</sub>	0.2	0.1	0.1	6.7
H19% <sub>r</sub>	0.1	0.0	0.1	2.6

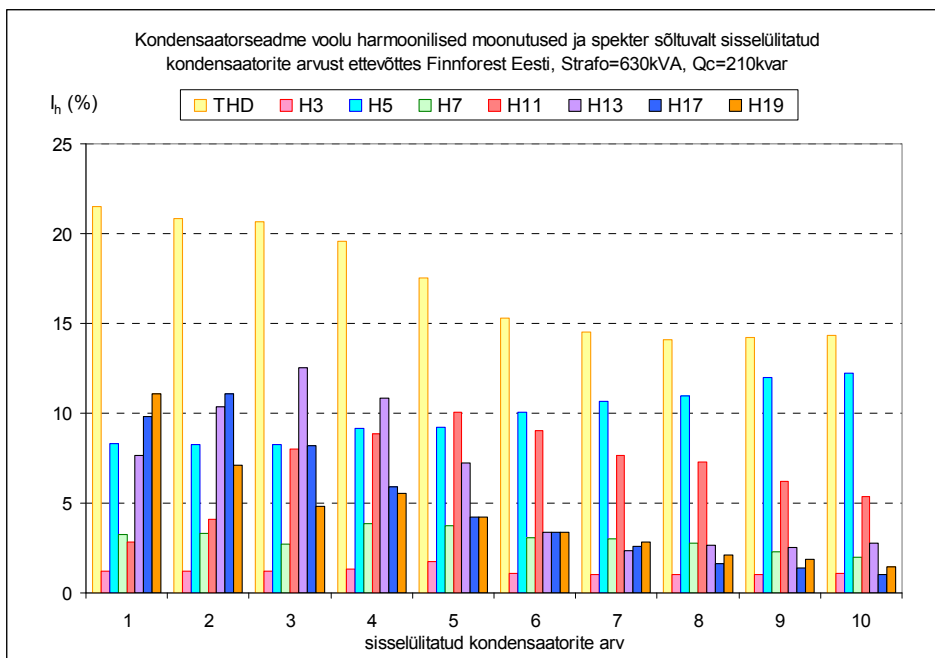
04/08/11 12:18:38 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160

Joonis 6.16. Trafo faasipingete harmooniliste spekter, kondensaatorid on sisse lülitatud, domineerib 5-s harmooniline

Kuna mingi ajahetke üksikud harmooniliste voolude spektrid pole ülevaatlilikud võimalike resonantside iseloomustamiseks, siis on tehtud järgmine katse. Algseisus oli kondensaatorseade välja lülitatud, seejärel lülitati astmed ükshaaval sisse ja igal astmel registreeriti voolu- ja pingeharmoonilised trafo voolus ja kondensaatorseadme voolus. Nii on saadud joonistel 6.17 ja 6.18 toodud voolu harmoonilised spektrid erineva kondensaatorite arvu jaoks.



Joonis 6.17. Trafo voolu harmoonilised moonutused ja spekter madala harmooniliste taseme korral, trafo võimsus  $S_{tr} = 630$  kVA, kondensaatorseadmel on 10 astet ja selle koguvõimsus  $Q_C = 210$  kvar, resonantsid nõrgalt väljendunud sagedustel  $h_{11}$ ,  $h_{13}$  ja  $h_{17}$



Joonis 6.18. Kondensaatorseadme voolu harmoonilised moonutused sõltuvalt sisselülitatud kondensaatorite arvust, resonantsid väljendunud sagedustel  $h_{11}$ ,  $h_{13}$  ja  $h_{18}$

### Mõõtetulemuste analüüs harmooniliste moonutuste madala taseme korral

1. Võrreldes trafo ja kondensaatorseadme vooluharmooniliste spektrite koosseisu on näha, et voolu harmooniliste spektri koosseis muutub tunduvalt koos kondensaatorite summaarse võimsuse muutumisega. Harmooniliste voolude absoluutväärtused joonistel 6.13...6.16 ei ole omavahel võrreldavad, kuna voolude põhiharmoonilised on erineva väärtusega. Joonistel 6.17 ja 6.18 on esitatud vooluharmooniliste spekter nii trafo voolus kui ka kondensaatorseadme voolus sõltuvalt sisselülitatud kondensaatorite arvust. Kondensaatorseadme voolus ei ole ükski harmooniline üle 12% voolu efektiivväärtusest.
2. Resonantsi 5-nda harmoonilise sagedusel ei teki, kuna kondensaatorite koguvõimsus antud trafo puhul ei ole sellele resonantssagedusele vastav. Resonantsid kõrgematel sagedustel on hästi jälgitavad kondensaatori voolus, kus resonantsile vastavatel harmoonilistel sagedustel ( $h_{11}$ ,  $h_{13}$ ,  $h_{17}$ ) suureneb antud vooluharmoonilise väärtus kuni 10...12 protsendini. Vastavate voolude absoluutväärtused on siiski väikesed, kuni 15 A, ja trafo voolus on need resonantsid vähemärgatavad.
3. Seega jääb antud juhul harmooniliste moonutuste tase madalaks ka siis, kui kõik kondensaatorid on sisse lülitatud, pinge- ja voolukuju moonutused on väikesed ja ja ohtu elektriseadmete isolatsioonile ei ole. Samuti ei suurenenud oluliselt trafo voolu üksikud harmoonilised.

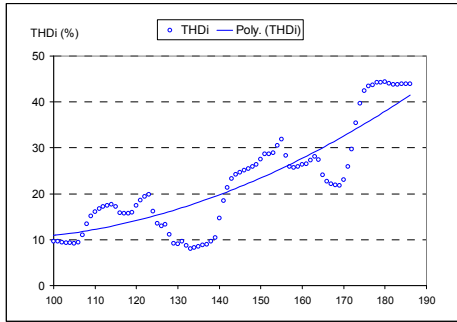
4. Pingemuutus faasipinges kondensaatorseadme lülitamisest on  $\Delta U = 4,4 \dots 4,6$  V ehk 1,8...1,9% ja aktiivvõimsuse muutus  $\Delta P = 6 \dots 7$  kW ehk ca 2%. Seega on aktiivvõimsuse suhteline muutus väga lähedane pinge suhtelisele muutusele. Eeldusel, et pingemuutuse ja aktiivvõimsuse seos on võrdeline, saame järeldada, et harmoonilised lisakaod antud süsteemis on väikesed (< 1%).
5. Harmooniliste moonutuste madala taseme tõttu ohtu seadmetele ei ole, olulisi lisakadusid harmoonilised voolud ei põhjusta, puudub vajadus filterreaktorite järele. On võimalik kompenseerida reaktiivvõimsus täies ulatuses.

#### **6.4.2 Harmooniliste voolude, pingete ja resonantsitingimuste mõõtetulemused moonutuste keskmise taseme korral**

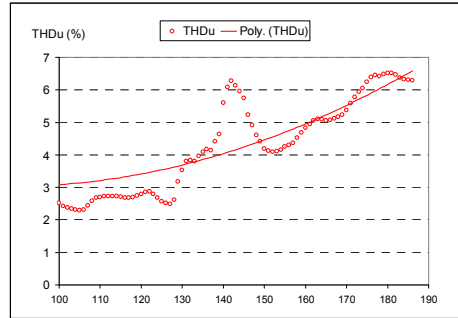
Harmooniliste moonutuste keskmine tase on tinglikult selline, kus teatud talitlustes jäävad harmoonilised moonutused lubatud piiridesse, teatud talitlustes aga ületavad kas kestvalt või episoodiliselt lubatud väärtusi. Reaktiivvõimsuse täielik kompensatsioon igal ajahetkel pole seetõttu soovitatav, kui ei kasutata filterreaktoreid. Samuti võib esineda ebasoovitavaid resonantse kas pidevalt või episoodiliselt erinevatel sagedustel teatud talitlustes. Resonantsi olukordades suurenevad voolud trafos, aga eriti kondensaatorseadme voolud kõrgematel harmoonilistel sagedustel ja samuti harmoonilised pinged kogu 0,4 kV elektrisüsteemis. Antud juhul nõuab elektrisüsteemi talitluse analüüs voolude ja pingete ning nende spektrite registreerivaid mõõtmisi. Tavaliselt on harmooniliste keskmise taseme korral pingemoonutused  $THD_u$  vahemikus 3...6% ja voolu-moonutused  $THD_i$  vahemikus 10...20%, kuid kondensaatorite kasutamisel võivad voolu-moonutused suureneeda kuni  $THD_i \approx 40 \dots 60\%$ . Samuti võivad esineda suured harmoonilised voolud ja pinged sagedustel  $h_5$ ,  $h_{11}$ ,  $h_{17}$  ja  $h_{19}$ . Järgnevas näites toodud mõõtetulemused ja katsed on läbi viidud ettevõttes Draka Cables AS Keilas, kus trafo nimivõimsus on 1000 kVA, tarbijateks on alalisvooluajamid, muunduritega asünkroonmootorid ja valgustid ning otselülituses asünkroonmootorid. Harmooniliste moonutuste tase ajas on keskmine kuni kõrge, kondensaatorseadme koguvõimsus oli 260 kvar, kondensaatorseadmel on 12 võrdset astet, filterreaktorid puuduvad.

Antud elektrisüsteemi talitluse uurimisel on kõigepealt joonistel 6.19 ja 6.20 toodud trafo voolu ja süsteemi pinge harmooniliste moonutuste  $THD$  tase sõltuvalt sisselülitatud kondensaatorite arvust. Iga mõõtepunkt joonistel vastab 1 s keskmisele voolu või pinge  $THD$  väärtusele. Kondensaatoreid järjestikku sisse lülitades kasvab harmooniliste moonutuste tase pinges alates ca 2,5...3 protsendist 6...7,5 protsendini ja voolu harmooniliste moonutuste tase trafo voolus ca 10-st kuni 40 protsendini. Voolu- ja pingekõvera kujud ilma kondensaatoriteta ja vooluresonantsi olukorras koos kondensaatoritega on näidatud joonistel 6.21 ja 6.22. Sellele olukorrale vastavad voolu- ja pingekõvera kujud on toodud joonisel 6.22. Kondensaatorseadme voolu harmooniliste spekter olukorras, kus kõik astmed on sisse lülitatud, on toodud joonisel 6.23 ja see vastab resonantsile harmoonilisel

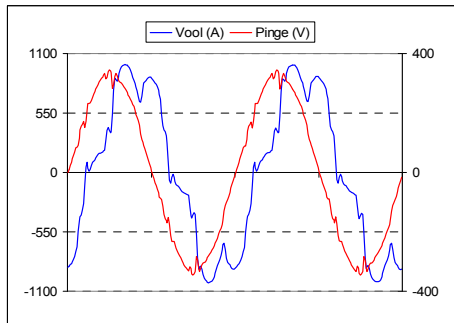
sagedusel  $h7$ . Kondensaatorseadme voolu harmooniliste spekter resonantsiolukorras sagedusel  $h11$  on toodud joonisel 6.24.



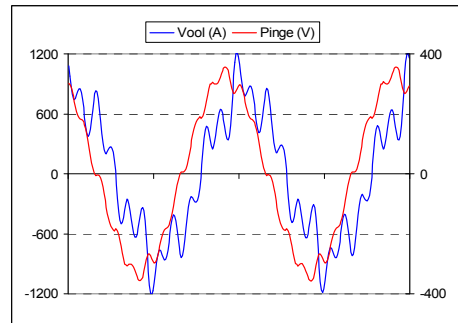
Joonis 6.19. Trafo voolu harmooniliste moonutuste  $THD_i$  muutus kondensaatorseadme astmete järjestikulisel sisselülitamisel ajas,  $Q_C = 260$  kvar,  $S_{tr} = 1000$  kVA



Joonis 6.20. Pingelise harmooniliste moonutuste  $THD_u$  muutused kondensaatorseadme astmete järjestikulisel sisselülitamisel ajas,  $Q_C = 260$  kvar,  $S_{tr} = 1000$  kVA



Joonis 6.21. Trafo voolu- ja pingekõvera kuju, kondensaatorseade on välja lülitatud



Joonis 6.22. Trafo voolu- ja pingekõvera kuju vooluresonantsi olukorras harmoonilisel sagedusel  $h11$ ,  $Q_C = 150$  kvar

Antud elektrisüsteemis esineb ulatuslikke vooluresonantse sagedustel  $h7$ ,  $h11$  ja  $h17$  ning kõrge harmooniliste moonutuste tase nii voolus kui ka pinges. Seetõttu on registreeritud trafo voolu ja kondensaatorseadme voolu harmoonilised ajas ning võrreldud erinevate vooluharmooniliste muutusi kondensaatorseadme erineva võimsuse korral. Selgus, et resonantsiolukorra tuvastamisel on ülevaatlikum võrrelda trafo ja kondensaatorseadme vooluharmooniliste absoluutväärtusi amprites, mitte suhtelisi väärtusi protsentides. Episoodilisi resonantse antud elektrisüsteemis iseloomustavad joonised 6.25 ja 6.26, kus on toodud kondensaatorseadme voolu harmoonilised moonutused sagedusel  $h17$ , kus resonants esineb *ca* 2 min vältel ja vool  $I_{h17}$  tõuseb 65 protsendini. Joonisel 6.26 on toodud kondensaatorseadme voolu harmoonilised moonutused, episoodiline resonants esineb sagedusel  $h17$ , kus kondensaatorseadme voolumoonutused  $THD_i$  tõusevad 80 protsendini. Rööpresonantsi mõju on hästi jälgitav kondensaatorseadme voolu ja trafovoolu harmooniliste spektris erineva arvu sisselülitatud kondensaatorite puhul, joonised 6.27 ja 6.28.

Lisaks on registreeritud kondensaatorseadme voolu harmooniliste spekter iga astme jaoks, kus ühe kondensaatori võimsus oli 21 kvar/400 V. Jooniselt 6.27 on näha, et resonants 11-nda harmoonilise sagedusel esineb seitsme kondensaatori sisselülitamisel.

Juhul, kui tarbijate toitevoolus on just samal sagedusel arvestatavalt vooluharmonilisi, tekib resonants, kus saavutab suurima väärtuse 11-s voolu- ja pingeharmoniline. Kondensaatorseadme voolus on 11-nda harmoonilise osa antud juhul 35% ja trafovoolus ca 25% voolu efektiivväärtusest. Trafo voolus oli 11-nda harmoonilise voolu absoluutväärtus antud hetkel ca 145 A, joonis 6.26. Ülevaاتlikult iseloomustab resonantsiolukorda joonis 6.24, kus on toodud kondensaatorseadme voolu ja trafovoolu harmoonilised amprites resonantsiolukorras sagedusel  $h_{11}$ . Sellel harmoonilisel sagedusel on voolud ligikaudu võrdsed.

HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N
THD%f	33.9	35.0	35.2	281.6
H5%f	19.9	20.2	21.3	52.0
H7%f	20.6	23.1	21.2	50.1
H11%f	15.6	13.9	15.7	44.1
H13%f	6.5	6.8	6.5	44.5
H17%f	3.3	3.1	3.2	45.1
H19%f	2.0	2.0	1.9	41.6
H23%f	2.8	2.8	3.1	42.6

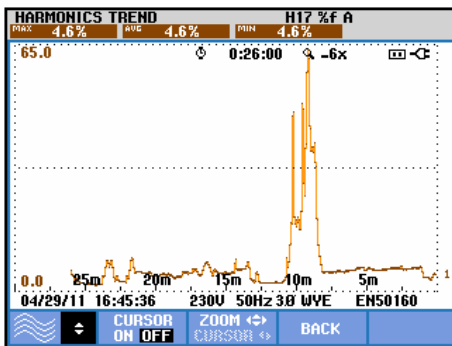
05/24/11 12:26:39 230U 50Hz 3Ø WVE ENS0160

Joonis 6.23. Kondensaatorseadme voolu harmooniliste spekter,  $Q_C = 260$  kvar, resonants harmoonilisel sagedusel  $h_7$

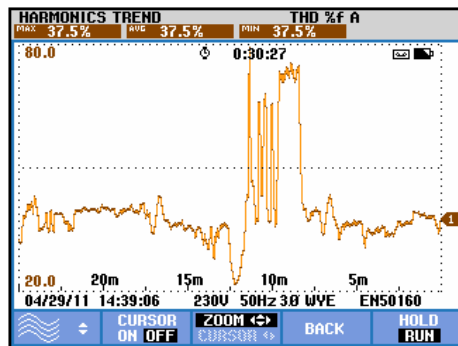
HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N
THD%f	79.0	31.2	32.7	134.0
H3%f	0.7	1.2	1.2	24.8
H5%f	8.7	17.5	17.7	23.7
H7%f	15.5	8.8	9.4	30.5
H11%f	73.8	23.9	25.6	27.1
H13%f	10.4	2.6	1.7	21.7
H17%f	14.3	1.6	1.6	19.6
H19%f	7.2	0.8	0.7	19.7

04/29/11 13:40:37 230U 50Hz 3Ø WVE ENS0160

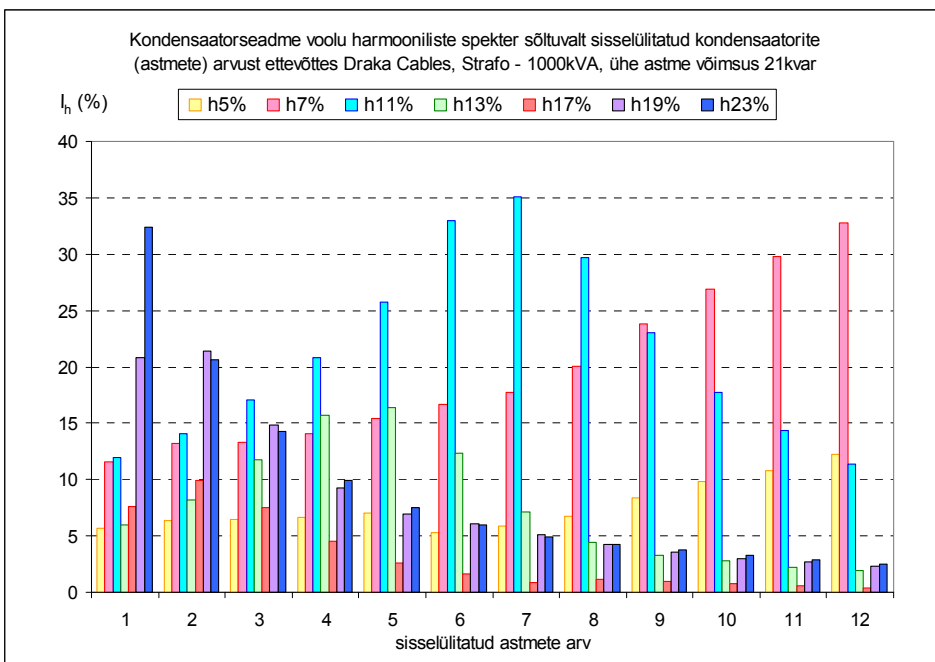
Joonis 6.24. Resonantsiolukord sagedusel  $h_{11}$ ; L1 – kondensaatorseadme vool, L2 ja L3 – trafo vool



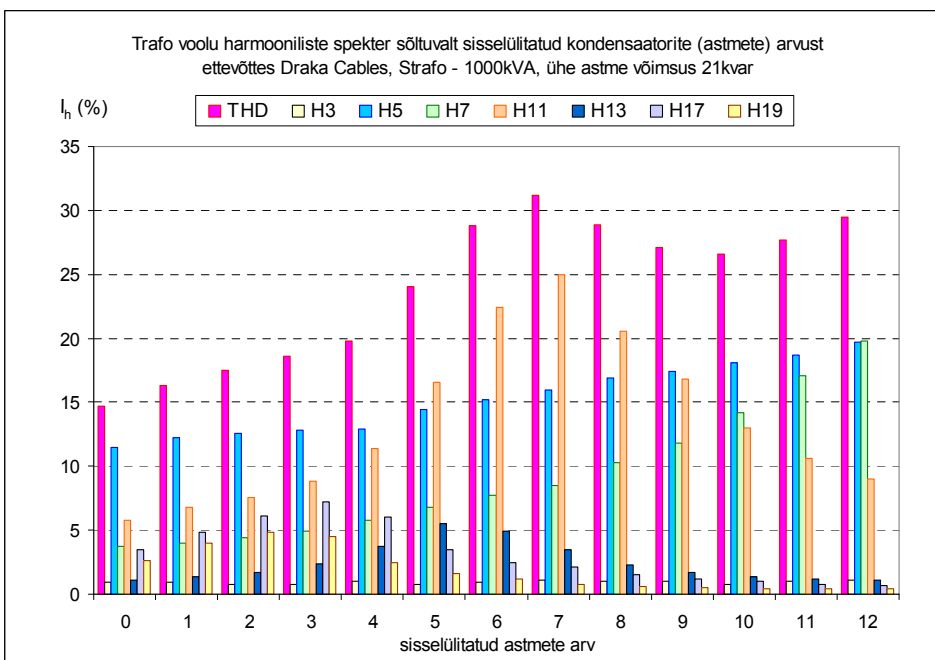
Joonis 6.25. Kondensaatorseadme voolu harmoonilised moonutused sagedusel  $h_{17}$ , resonants, kus vool  $I_{h_{17}}$  tõuseb 65 protsendini



Joonis 6.26. Kondensaatorseadme voolu harmoonilised moonutused  $THD_i$ , resonants, kus  $THD_i$  tõuseb 80 protsendini



Joonis 6.27. Kondensaatorseadme voolu harmooniliste spekter sõltuvalt sisselülitatud kondensaatorite (astmete) arvust, resonantsid selgesti jälgitavad



Joonis 6.28. Trafo voolu harmooniliste spekter sõltuvalt kondensaatorseadme sisselülitatud kondensaatorite (astmete) arvust, resonantsid selgesti jälgitavad



## Mõõtetulemuste analüüs harmooniliste moonutuste keskmise taseme korral

1. Kondensaatorite lülitamisega 0,4 kV elektrisüsteemi kasvavad voolu ja pinge harmoonilised kogumoonutused  $THD_u$  oluliselt – mida suurem on kondensaatorite koguvõimsus, seda suuremad on ka trafo voolu ja pinge suhtelised harmoonilised kogumoonutused. Samuti suurenevad harmooniliste voolude absoluutväärtused kondensaatorseadme voolus ning muutub harmooniliste voolude spekter sõltuvalt sisselülitatud kondensaatorite arvust. Kondensaatorseadme suhtelised voolumoonutused ulatuvad kuni 80 protsendini.
2. Ilma kondensaatoriteta süsteemis on trafovoolumoonutused domineerivaks 5-s vooluharmooniline, edasi järgnevad 11-s, 17-s, 7-s, 19-s, 23-s ja 3-s harmooniline. Sisselülitatud kondensaatorite puhul hakkab trafo voolus tugevasti domineerima 5-s, järgnevad 7-s ja 11-s harmooniline. Kõrgemat järku vooluharmoonilised trafovoolumoonutused vähenevad märgatavalt, kuna sulguvad kondensaatorites, mis kõrgemal sagedusel on väga väikese takistusega.
3. Vooluharmooniliste kogumoonutused ja üksikud vooluharmoonilised on ajas väga muutlikud, nii näiteks trafo voolu  $THD_i$  muutus umbes 25 min jooksul vahemikus 20...53%. Kondensaatorite voolus muutus  $THD_i$  veelgi enam – vahemikus 20...80%.
4. Süsteemi resonantssagedusi iseloomustab kõige paremini joonisel 6.27 toodud kondensaatorseadme voolu spekter, mis on registreeritud igal kondensaatorseadme astmel. Sellel on hästi näha näiteks maksimum 11-ndal harmoonilisel, kui sisse on lülitatud seitse kondensaatorit. Sama maksimum esineb ka trafo voolu spektris, vt joonis 6.28. Trafo voolu spektrit analüüsides selgub, et kondensaatorite lülitamise käigus suureneb näiteks 5-s vooluharmooniline 12-lt 20 protsendini, 7-s vooluharmooniline 4-lt 20-ni, 11-s vooluharmooniline 6-lt 25-ni, 13-s vooluharmooniline kuni 6 protsendini, 17-s vooluharmooniline 3,5-lt 7 protsendini. Seega on resonantsid jälgitavad nii trafo voolus kui ka kondensaatorite voolus.
5. Resonantside ulatus ja kestus on ajas juhuslik ja sõltub sisselülitatud kondensaatorite arvust ning mittelineaarsete tööseadmete talitlusest. See on hästi jälgitav joonistel 6.25 ja 6.26, kus resonants kondensaatorseadme voolus (ja seega ka trafo voolus) esineb episoodiliselt mõne minuti vältel. Resonantsi iseloomustab kõige paremini just kondensaatorseadme vooluharmooniline antud resonantssagedusel.
6. Antud juhul on kondensaatorseadme võimsuse osas kasutusel suurim võimsus, mis ilma reaktoriteta variandis võimalik on. Kondensaatorid on seejuures kõrgema nimipingega (440 V) ja seitsme aasta vältel pole kondensaatorite rikkeid ette tulnud.
7. Harmooniliste moonutuste vähendamiseks voolus ja pinges on soovitatav välja vahetada alalisvoolumuundur, mis mõjutab oluliselt 5-nda ja 11-nda harmoonilise taset, voolu ja pinge kuju ja spektrit süsteemis.

8. Katse- ja mõõtetulemused näitavad, et antud elektrisüsteemis on kõige suurema ulatusega resonants 11-nda ja 17-nda harmoonilise sagedusel, mitte 5-ndal või 7-ndal, nagu võiks eeldada. Näiteks suureneb trafo voolus 11-s harmooniline resonantsi olukorras 4...5 korda ja kondensaatorseadme voolus 3...4 korda. Samuti ületab selles olukorras normi 3,5% pinge 11-s harmooniline, ulatudes ligikaudu kuni 8 protsendini. Süsteemi talitus sellistes tingimustes on kindlalt ebasoovitav.
9. Kondensaatoritele on antud elektrisüsteemis ohtlikud kaks olukorda. Esiteks see, kui sisse on lülitatud ainult üks või kaks kondensaatorit. Sel juhul sulguvad kõrgema sagedusega vooluharmoonilised kondensaatorites ja nende liigkoormus voolu järgi on 35...40%. See on hästi näha ka spektrist joonisel 6.27, kus sisselülitatud kondensaatorid on üle koormatud vooluharmoonilistega  $h_{17}$ ,  $h_{23}$ ,  $h_{25}$ ,  $h_{29}$ ,  $h_{35}$  ja  $h_{41}$ . Teine ohtlik juhus on resonantsiolukord, siis on sisselülitatud kondensaatorid üle koormatud madalamat järku vooluharmoonilistega  $h_5$ ,  $h_7$ ,  $h_{11}$ ,  $h_{17}$ , mille mõju kondensaatorite lisakadudele pole nii suur.

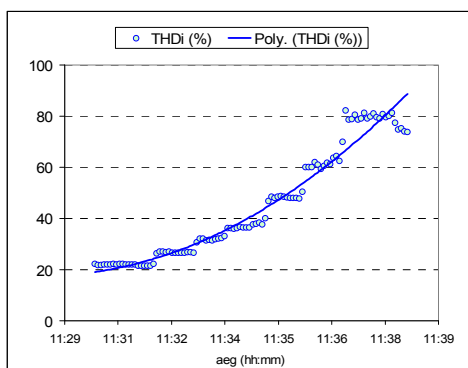
#### **6.4.3 Harmooniliste voolude, pingete ja resonantsitingimuste mõõtetulemused moonutuste kõrge taseme korral**

Harmooniliste voolude ja pingete taset 0,4 kV elektrisüsteemis võib pidada kõrgeks juhul, kui ilma kondensaatoriteta on sellises süsteemis voolu moonutused  $THD_i$  vahemikus 10...30% ja pinge moonutused  $THD_u$  vahemikus 5...8%. Kondensaatorite lülitamine elektrisüsteemi eesmärgiga kompenseerida reaktiivvõimsus põhjustab voolu ja pinge harmooniliste kogumoonutuste järsu suurenemise. Ilma filterreaktorita kondensaatorite kasutamisel reaktiivvõimsuse kompensatsiooniks tekivad ulatuslikud resonantsid, voolu harmoonilised moonutused võivad ulatuda 100 protsendini ja isegi üle selle, toitepinge moonutused ületavad standardis sätestatud piirväärtused ja kogu elektrisüsteemis võib esineda häiringuid ja tõrkeid. Antud punktis toodud mõõtmiste ja katsete eesmärgiks oli välja selgitada selliste resonantside ja harmooniliste moonutuste ulatus reaalses 0,4 kV elektrisüsteemis.

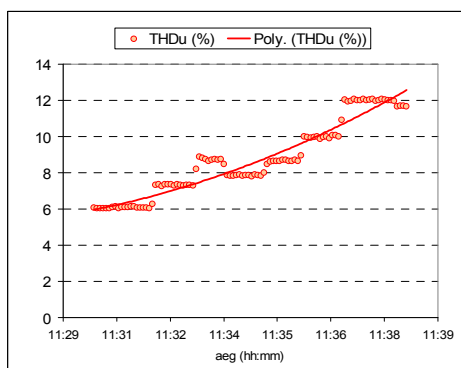
Alljärgnevad mõõte- ja katsetulemused on saadud polüetüleentorusid valmistavas ettevõttes Haka Plast, kus trafo 10/0,4 kV nimivõimsus on 800 kVA, tarbijateks on põhiliselt 3-faasilised 6-pulsilised alaldid ja muundurid, tegelik võimsustegur on madal ( $TPF=0,6$ ), kondensaatorseadme koguvõimsus on 350 kvar, filterreaktorid puuduvad. Kondensaatorite sisse lülitamisel tõuseb harmooniliste moonutuste tase nii voolus kui ka pinges. Kui algselt ilma kondensaatoriteta on moonutuste tase rahuldav, pinge kogumoonutused  $THD_u$  on 5,5...6% ja voolumoonutused  $THD_i$  20...24%, siis kondensaatoreid süsteemi järjest juurde lülitades tõuseb harmooniliste moonutuste tase nii pinges kui ka voolus ebasoovitavalt või isegi lubamatult kõrgele. Näiteks pinge harmoonilised moonutused  $THD_u$  ületavad standardiga EVS-EN 50160 lubatud taseme 8% juba kahe kondensaatori sisselülitamisel. Kogu kondensaatoripatarei sisselülitamisel suurenevad pinge harmoonilised moonutused  $THD_u$  tasemeni 12% ja voolumoonutused  $THD_i$  tasemeni 40...60%. Resonantsiolukorras ulatuvad antud elektrisüsteemis pinge harmoonilised

moonutused  $THD_u$  tasemeni 16...18% ja voolumoonutused  $THD_i$  tasemeni 80...120%. Elektrisüsteemi töö sellises olukorras põhjustab suuri lisakadusid toitetrafos, mootorites, kondensaatorites ja kaablites ning põhjustab häiringuid elektriseadmete (näiteks kaitselülite, pingereleede, valgustite) töös. Samuti on pingeharmoniliste suurenemine kahjulik kondensaatoritele, mis on ülekoormatud, kuumenevad ja muutuvad kiiresti avariiliseks.

Pinge- ja voolu harmooniliste kogumoonutuste taset sõltuvalt sisselülitatud kondensaatorite arvust antud elektrisüsteemis iseloomustavad joonised 6.29 ja 6.30, kus on toodud trafo voolu ja pinge harmooniliste moonutuste  $THD_i$  ja  $THD_u$  sõltuvus kondensaatorite võimsusest ajas ja vastavad trendid polünoomi kujul.



Joonis 6.29. Trafo voolu harmooniliste kogumoonutuste  $THD_i$  (%) suurus ajas kondensaatorite sisseülitamisel, trafo 800 kVA, kondensaatorseade 300 kvar

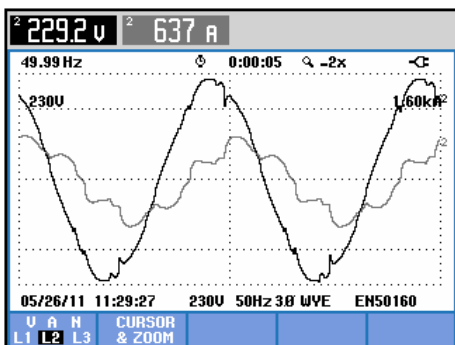


Joonis 6.30. Trafo pinge harmooniliste kogumoonutuste  $THD_u$  (%) suurus ajas kondensaatorite sisselülitamisel harmooniliste kõrge taseme korral

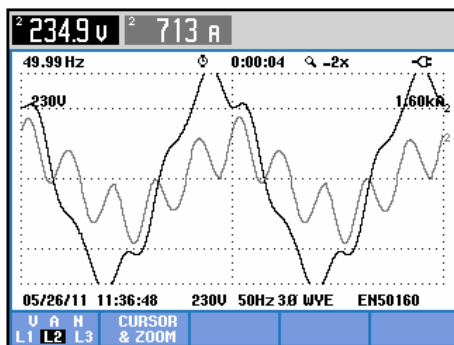
Järgmiseks on joonistel 6.31...6.32 toodud trafo voolu- ja pingekõvera kujud ja joonistel 6.33...6.36 harmooniliste voolude ja pingete spektrid antud elektrisüsteemi kahes olukorras – ilma kondensaatoriteta ja sisselülitatud kondensaatoritega, mille koguvõimsus on 300 kvar. Spektrid annavad ülevaate harmooniliste muutustest kondensaatorite sisselülitamisel.

Nagu võis eeldada, muutuvad kondensaatorite astmelisel sisselülitamisel oluliselt pingekõvera ja voolukõvera kujud ning spektrid nii trafo voolus kui ka kondensaatorseadme voolus, selle kinnituseks on mõtetulemused joonistel 6.33...6.36. Kui ilma kondensaatoriteta süsteemis esineb pinges lisaks domineerivale 5-ndale harmoonilisele ka kõrgemat järku harmoonilisi nagu 11-s ja 17-s, siis kondensaatoritega süsteemis domineerib pinges ainult 5-s harmooniline. Samasugune on olukord ka voolumoonutustega.

Kondensaatorite sisse lülitamisel kasvab harmooniliste moonutuste tase nii trafo voolus kui ka pinges, kusjuures kasv suureneb märgatavalt, kui kondensaatorite võimsus ületab piiri ca 200 kvar. Voolu kogumoonutustes  $THD_i$  domineerib 5-s harmooniline, veel esinevad vähesel määral 7-s ja 11-s harmooniline.



Joonis 6.31. Pinge- ja voolukõvera kuju trafo klemmidel väljalülitatud kondensaatorite puhul,  $\cos\varphi = 0,63$ ;  $TPF = 0,6$



Joonis 6.32. Trafo pinge- ja voolukõvera kuju sisselülitatud kondensaatorite puhul,  $Q_C = 300$  kvar,  $\cos\varphi = 0,98$ ;  $TPF = 0,92$

HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N
THD% <sub>f</sub>	22.4	22.6	20.1	393.9
H3% <sub>f</sub>	0.6	1.2	1.5	63.3
H5% <sub>f</sub>	21.3	21.6	19.0	77.1
H7% <sub>f</sub>	3.0	2.8	2.4	65.2
H11% <sub>f</sub>	3.3	3.4	3.3	70.7
H13% <sub>f</sub>	1.7	2.0	1.6	65.4
H17% <sub>f</sub>	3.1	3.1	2.9	61.9
H19% <sub>f</sub>	1.3	1.3	1.1	61.6

Joonis 6.33. Trafo voolu spekter, kondensaatorid on välja lülitatud, voolud:  $I_{h1} = 700$  A,  $I_{h5} = 137$  A,  $I_{h7} = 18$  A,  $I_{h11} = 21$  A,  $I_{h17} = 20$  A,  $I_{h23} = 17$  A

HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N
THD% <sub>f</sub>	86.4	71.9	70.1	329.1
H3% <sub>f</sub>	2.1	1.6	1.0	56.6
H5% <sub>f</sub>	86.1	71.6	69.9	95.4
H7% <sub>f</sub>	5.4	4.8	2.8	54.3
H11% <sub>f</sub>	2.4	2.9	2.5	49.9
H13% <sub>f</sub>	0.7	0.8	0.8	50.9
H17% <sub>f</sub>	0.6	0.5	0.3	52.9
H19% <sub>f</sub>	0.3	0.3	0.5	48.7

Joonis 6.34. Trafo voolu spekter resonantsiolukorras, kondensaatorid on sisse lülitatud, voolud:  $I_{h5} = 455$  A,  $I_{h7} = 25$  A,  $I_{h11} = 17$  A

HARMONICS TABLE				
Volt	L1	L2	L3	N
THD% <sub>r</sub>	6.0	6.1	5.9	77.5
H3% <sub>r</sub>	0.4	0.4	0.3	16.7
H5% <sub>r</sub>	5.0	5.0	4.9	40.1
H7% <sub>r</sub>	0.3	0.4	0.4	1.9
H11% <sub>r</sub>	2.2	2.4	2.3	25.2
H13% <sub>r</sub>	0.8	1.1	0.9	17.6
H17% <sub>r</sub>	1.3	1.4	1.5	27.4
H19% <sub>r</sub>	0.6	0.7	0.7	8.8

Joonis 6.35. Trafo pinge harmoonilised moonutused ja spekter, kondensaatorid on välja lülitatud, domineerivad harmoonilised järguga 5-s, 11-s ja 17-s

HARMONICS TABLE				
Volt	L1	L2	L3	N
THD% <sub>r</sub>	12.4	12.3	12.8	89.8
H3% <sub>r</sub>	0.5	0.6	0.3	19.6
H5% <sub>r</sub>	12.3	12.0	12.6	80.8
H7% <sub>r</sub>	1.9	2.3	1.7	6.1
H11% <sub>r</sub>	0.9	1.0	1.0	8.4
H13% <sub>r</sub>	0.2	0.3	0.2	6.4
H17% <sub>r</sub>	0.1	0.1	0.1	7.6
H19% <sub>r</sub>	0.1	0.1	0.0	7.8

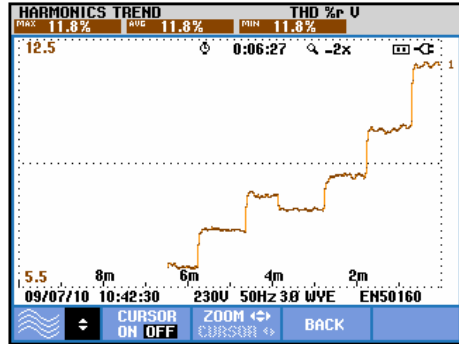
Joonis 6.36. Trafo pinge harmoonilised moonutused ja spekter, kondensaatorid on sisse lülitatud,  $Q_C = 300$  kvar, domineerib 5-s harmooniline

Kondensaatorseadme võimsusel 300 kvar esines resonants sagedusel  $h_5$ , lisaks tekkisid elektrisüsteemis häiringud, näiteks rakendusid näiliselt põhjuseeta valgusti-gruppide kaitselülitid ja ka 0,4 kV jaotla peakaitselüliti nimivooluga 1200 A. Resonantsi olukord esines episoodiliselt, kui töös olid kõik neli plasttoruliini ja samaaegselt lülitusid sisse kõik kondensaatorid.

HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N
THD%f	68.4	66.0	68.1	304.3
H3%f	0.5	1.4	1.1	47.3
H5%f	62.0	56.7	60.7	82.4
H7%f	19.0	26.3	24.4	53.4
H11%f	19.7	19.4	16.8	50.7
H13%f	5.2	5.6	4.5	43.1
H17%f	5.4	5.3	5.5	49.0
H19%f	2.1	2.1	2.1	50.3

05/26/11 11:41:30 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160

Joonis 6.37. Kondensaatorseadme voolu harmoonilised moonutused ja spekter,  $THD_u = 12\%$ ,  $I_{rms} = 526$  A,  $I_{h1} = 438$  A,  $I_{h5} = 270$  A,  $I_{h7} = 120$  A,  $I_{h11} = 82$  A

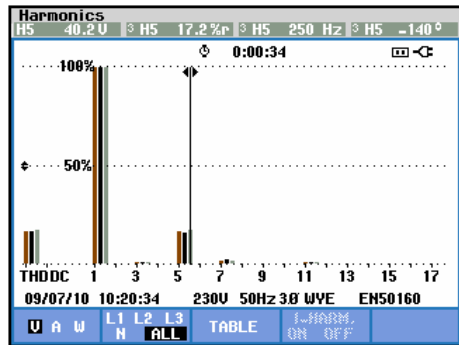


Joonis 6.38. Trafo pingeline harmoonilised moonutused  $THD_u$ , kondensaatorite ( $6 \times 50$  kvar) astmelise sisselülitamise,  $THD_u$  tõuseb 12,5 protsendini,  $Q_C = 300$  kvar

HARMONICS TABLE				
Volt	L1	L2	L3	N
THD%r	16.3	15.8	17.2	94.2
H3%r	0.5	0.7	0.4	18.0
H5%r	16.2	15.7	17.2	87.5
H7%r	1.7	1.9	1.5	4.5
H11%r	0.7	0.8	0.8	6.0
H13%r	0.2	0.2	0.1	6.3
H17%r	0.0	0.1	0.1	6.0
H19%r	0.1	0.1	0.0	7.4

09/07/10 10:20:34 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160

Joonis 6.39. Pingeline moonutused ja spekter vooluresonantsi olukorras sagedusel  $h_5$ ,  $THD_u$  tõuseb kuni 17 protsendini



Joonis 6.40. Pingeline 5-s harmooniline vooluresonantsi olukorras, kus pingeline 5-s harmooniline  $U_{h5} = 17,2\%$  ehk 40,2 V

Joonisel 6.37 on toodud kondensaatorseadme vooluharmooniliste spekter juhul, kui kondensaatorseadme võimsus oli 350 kvar. Kondensaatorseadme voolus esines oluliselt rohkem 7-ndat, 11-ndat, 13-ndat ja 17-ndat järku harmoonilisi kui trafo voolus. Joonisel 6.38 on toodud pingeline harmooniliste moonutuste  $THD_u$  muutus kondensaatorite astmelisel sisselülitamisel. Järk-järgult toimub lähenemine resonantsiolukorrale 5-nda harmoonilise sagedusel, resonantsiolukorras ( $Q_C = 350$  kvar) ulatub pingeline 5-s harmooniline  $U_{h5}$  kuni 17,2 protsendini. Resonantsiolukorda iseloomustavad pingete spekter joonisel 6.39 ja 5-nda harmoonilise pingeline joonisel 6.40.

## Mõõtetulemuste analüüs harmooniliste moonutuste kõrge taseme korral

1. Kondensaatorite lülitamisega kõrge harmooniliste tasemega süsteemi kasvavad oluliselt (kordades) harmoonilised moonutused voolus ja pinges, reaktiivvõimsuse täieliku kompensatsiooni korral ( $\cos\varphi=0,98\dots1,00$ ) kasvavad antud juhul voolu kogumoonutused  $THD_i$  tasemelt ca 20% kuni 80...120 protsendini, seega ca 4...6 korda. Pinge kogumoonutused  $THD_u$  suurenevad samal ajal ca 6-lt protsendilt kuni 12 protsendini, seega ca 2 korda, ja resonantsiolukorras kuni 18 protsendini ehk kuni 3 korda. Selline moonutuste tase on lubatavast tasemest oluliselt suurem. Seetõttu ei saa reaktiivvõimsuse täielikku kompensatsiooni ilma filterreaktoriteta kasutada.
2. Antud elektrisüsteemis on domineeriv 5-s harmooniline ja vähemal määral ka 11-s harmooniline. Ilma kondensaatoriteta on 5-nda harmoonilise vool ca 20% koguvoolust ehk 120...140 A ja 11-nda harmoonilise vool ca 5% koguvoolust ehk 30...35 A. Ülejäänud harmoonilised voolud jäävad alla 1% koguvoolust. Pinges on 5-nda harmoonilise suhteline väärtus 5%, 11-ndal 2,3% ja 17-ndal 1,4%. Ülejäänud harmoonilised pinged on alla 1%.
3. Kondensaatorite lülitamine kõrge harmooniliste tasemega süsteemi ilma filterreaktoriteta on ebasoovitav ja täielik kompensatsioon sellisel viisil on ettevõttele isegi kahjulik. Antud juhul põhjustab näiteks kahe kondensaatori sisselülitamine (kokku 100 kvar) vooluresonantsi 11-nda harmoonilise sagedusel, kus näiteks vastav harmoonilise pinge suhteline väärtus tõuseb 5 protsendini (standardiga on lubatud 3,5%). Kriitilised on 5-nda harmoonilise pinge ja vool. Pinge 5-nda harmoonilise väärtus kasvab iga kondensaatori sisselülitamisega ja saavutab kuue kondensaatori puhul väärtuse ca 12%, mis on 2 korda kõrgem lubatust. Kui kondensaatorseadme võimsust suurendada võimsuseni 350 kvar, tõuseb 5-nda harmoonilise pinge suhteline väärtus 16...18 protsendini ja absoluutväärtus ca 40 voldini. Seega on antud süsteemis ohtlikud vooluresonantsid 5-nda ja 11-nda harmoonilise sagedusel.
4. Kõrge harmooniliste tasemega 0,4 kV elektrisüsteemis on vajalik registreerida harmoonilised voolud ja pinged juba enne kondensaatorseadme paigaldamist ja valida kondensaatorseadme võimsus selliselt, et resonantssagedusega ei satutaks domineerivatele harmoonilistele. Samuti on soovitatav suurendada trafo (toiteahela) võimsust, et see oleks vähemalt 1000 kVA, sellega väheneks resonantsi ulatus 5-ndal harmoonilisel sagedusel. Oluline on ka alaldite ja muundurite vahetamine võrgusõbralikumate (näiteks 12-pulsiliste või filtriga varustatud) vastu. Kui soovitakse vähendada reaktiivenergia kulusid kõrge harmooniliste tasemega elektrisüsteemis, tuleb leida majanduslikult optimaalne lahendus trafo võimsuse, kasutatavate muundurite liigi ja voolu harmooniliste moonutuste ning filterkondensaatorseadme parameetrite võimsuse vahel.
5. Harmooniliste voolude ja pingete kõrge taseme korral võib osutuda ebasoovitavaks või isegi lubamatuks reaktiivvõimsuse osaline või täielik kompenseerimine ilma filterreaktoriteta kondensaatorseadmetega. Elektrisüsteemi töö

kõrge moonutuste taseme tingimustes põhjustab suuri lisakadusid trafos, mootorites, kondensaatorites ja kaablites ning häiringuid elektriseadmetes. Samuti on elektriseadmed ülekoormatud, kuumenevad ja vananevad kiiresti.

#### **6.4.4 Järeldused harmooniliste voolude, pingete ning resonantsi tingimuste uurimisest erineva moonutuse tasemega elektrisüsteemides**

Elektrisüsteemides, kus on mittelineaarsete seadmete võimsuse osakaal võrreldes trafo nimivõimsusega suhteliselt suur, 20% ja enam, võivad esineda suured voolu ja pinge harmoonilised moonutused ning vooluresonantsi olukorrad erinevatel sagedustel. Selliste elektrisüsteemide talitluse optimeerimine ja seadmete valik eeldab harmooniliste voolude ja pingete uurimist süsteemi erinevates talitlustes. Kuna harmooniliste voolude suurus ja spekter on ajas kiiresti ja suurtes piirides muutuv, siis ei piisa pistelistest ühekordsetest mõõtmistest, vaid on vaja registreerida harmoonilised voolud ja pinged piisava ajavahemiku vältel.

Mõõtepunktideks voolude osas on trafo madalpinge latid või voolutrafode sekundaarahelad ning kondensaatorseadme latid või toitekaabli sooned. Pingete mõõtmisel on mõõtepunktiks trafo madalpinge latid ja filterkondensaatorseadme puhul kondensaatori klemmid.

1. Süsteemi harmooniliste voolude analüüsiks on vaja registreerida süsteemi vooluharmoonilised trafo voolus ilma kondensaatoriteta ja filterseadmeteta olukorras. Voolud peaksid olema nii protsentides kui ka amprites, soovitatavalt ka ajalises lõikes, näiteks 1 tunni vältel sammuga 1 sekund.
2. Paralleelresonantside kindlakstegemiseks elektrisüsteemis tuleks algul välja lülitada kondensaatorseade, seejärel lülitada järjestikku sisse kõik kondensaatorseadme kondensaatorid ja registreerida samal ajal trafo voolu ja kondensaatori voolu harmoonilised voolukomponendid. Kui mõni neist harmoonilistest vooludest domineerib ning trafo voolu ja kondensaatori voolu harmoonilised komponendid (amprites) on ligikaudu võrdsed, on tõenäoliselt tegu resonantsiga antud sagedusel või selle läheduses.
3. Ettevõtte elektrisüsteemi vooluharmooniliste spektri koosseis ja üksikute harmooniliste tase võib olla ajas kiiresti ja suurtes piirides muutuv. Resonants võib esineda episoodiliselt erinevatel sagedustel. Kuna automaatse kondensaatorseadme sisselülitatud kondensaatorite arv muutub töö ajal pidevalt sõltuvalt võimsustegurist  $\cos\varphi$ , siis muutub ka kogu elektrisüsteemi trafo–kondensaator resonantssagedus. Järelikult võivad resonantsinähtused esineda ajas episoodiliselt ja muutuva kestusega. Seetõttu on pisteliste mõõtmistega raske resonantsiolukorda tabada. Vaja on registreerida kondensaatorseadme voolu harmoonilised kondensaatorseadme töö ajal, näiteks 1 h vältel sammuga 1 s.
4. Resonantsitingimuste tuvastamisel ei saa lähtuda ainult kondensaatorseadme voolu spektrist. Selles võib olla kõrge harmooniliste voolude suhteline tase mitmel harmoonilisel sagedusel, näiteks  $h5$ ,  $h7$ ,  $h11$  ja  $h17$ . Samal ajal võib harmoonilise voolu absoluutväärtus amprites olla suhteliselt väike. Resonantsi-

olukorra ja ulatuse tuvastamiseks on vaja võrrelda kondensaatorseadme vooluharmonilisi ja trafo vooluharmonilisi. Resonants esineb ja on olulise mõjuga, kui mingil harmoonilisel sagedusel kasvab vooluharmoniline kordades nii kondensaatorseadme voolus kui ka trafo voolus. Seejuures on resonantssagedusel trafo ja kondensaatorseadme harmoonilised voolud amprites ligikaudu võrdsed. Enamasti on sellel harmoonilisel sagedusel ka vastava vooluharmonilise suhteline väärtus voolu efektiivväärtusest protsentides kõige suurem.

5. Resonantsitingimuste uurimisel on ülevaatlik registreerida vooluharmoniliste spekter nii kondensaatorseadme voolus kui ka trafo voolu igal kondensaatorseadme astmel. Seda saab teha reaktiivvõimsuse regulaatorit kasutades. Kõigepealt lülitatakse automaatne kondensaatorseade välja ja seejärel kondensaatorid üksikhaaval sisse, registreerides samal ajal vooluharmonilised. Harmooniliste voolude registreerimine kondensaatorseadme voolus sõltuvalt sisselülitatud kondensaatorite arvust annab hea ülevaate resonantssageduse ja spektri muutumisest üksikute kondensaatorite sisselülitamise käigus. Ajalises lõikes elektrisüsteemis esinevate resonantsvoolude uurimisel ei ole see vajalik, siis tuleks registreerida voolu harmoonilised süsteemi ja kondensaatorseadme tavapärase seadistusega.
6. Liiga suurte resonantsist tingitud harmooniliste voolude vältimiseks on soovitatav kasutada reaktiivvõimsuse regulaatori funktsiooni, mis etteantud trafo voolu harmooniliste taseme juures lülitab kondensaatorid üksikhaaval välja. Soovitatav on see tase valida vahemikus 20...30%. Selline funktsioon on olemas kõigil kaasaegsetel protsessoriga regulaatoritel.
7. Resonantsiolukorra tuvastamiseks ja sellele õigeks reageerimiseks võiks reaktiivvõimsuse regulaatoril olla veelgi täpsem funktsioon, kus regulaator mõõdab ja analüüsib pidevalt ajas trendina nii trafo voolu ja selle harmoonilisi komponente kui ka kondensaatorseadme voolu ja selle harmoonilisi komponente. Võrreldes neid parameetreid põhilistel resonantsi harmoonilistel sagedustel  $h_5$ ,  $h_7$ ,  $h_{11}$ ,  $h_{13}$  ja  $h_{17}$  saab regulaator valida sellise kondensaatorite arvu ja sellise lülitussuuna, järjekorra ning viited, kus resonantsist tingitud harmoonilised voolud jäävad suhteliselt madalaks võrreldes püsitalitusega. Seega on siin võimalus regulaatorite edasiarendamiseks juhtsignaalide ja tarkvara osas.
8. Harmooniliste voolude peamiste allikate kindlaksmääramisel saab toimida järgmiselt. Vooluharmoniliste kulgemist elektrisüsteemis võib vaadelda kui vooluharmoniliste liikumist harmooniliste allikast toitevõrgu suunas, kuna toitevõrgu näivtakistus on neile kõige väiksem. Harmooniliste allika kindlakstegemiseks juhul, kui esineb üks või mõned üksikud suure võimsusega domineerivad ebalineaarsed tarbijad, tuleb kõigepealt kõik kondensaatorseadmed välja lülitada ja seejärel mõõta domineerivate vooluharmoniliste suurus (tavaliselt 5-s harmooniline) eraldi igal toitefiidril või toitekaablil, liikudes alajaamast tarbijate poole. Seadmete harmoonilised voolud ei tohi ületada standardites [40, 41, 42] toodud väärtusi sõltuvalt trafo lühisvõimsusest. Kui



seadme voolumoonutused ületavad lubatud piirväärtusi, siis tuleks asendada muundur, mitte paigaldada lisafiltreid.

## **6.5 Metoodika kirjeldus harmooniliste voolude, pingete ning resonantside uurimiseks 0,4 kV elektrisüsteemides**

Harmoonilised voolud ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides muutuvad sageli pidevalt suurtes piirides nii harmooniliste spektri koosseisu kui ka üksikute vooluharmooniliste ulatuse osas. Harmooniliste voolude tase on ühtlasem, kui süsteemis on suur hulk väiksema võimsusega mittelineaarseid tarbijaid ja kõikumam, kui süsteemis on mõned mittelineaarseid tarbijaid, mille võimsus on suur toittrafo võimsuse suhtes. Võimsamad muundurid ja alaldid töötavad sageli väga muutlikus režiimis vastavalt tööseadme koormusele ja seetõttu muutub ka vooluharmooniliste spekter ja tase pidevalt. Järelikult on pisteliste mõõtmistega saadav informatsioon harmoonilistest vooludest, pingetest ja võimalikust resonantsist ebapiisav ja võib anda isegi väära ettekujutuse olukorrast elektrisüsteemis, näiteks juhul, kui kõik võimsad muundurid pole töös.

Automaatse kondensaatorseadmega varustatud 0,4 kV elektrisüsteem annab hea võimaluse harmooniliste ja resonantside uurimiseks, ilma et peaks kuidagi häirima ettevõtte tööd, näiteks tegema seisakuid seadmete töös vms. Nimelt on üksikute kondensaatorite sisselülitamisega võimalik muuta elektrisüsteemi resonantssagedust ja harmooniliste voolude ja pingete taset ja kindlaks teha süsteemi kriitilised resonantssagedused ning nende ulatused. Sageli võimaldab just kondensaatorseadme astmete lülitamine ja vooluharmooniliste registreerimine kindlaks teha, kas antud juhul on harmoonilised voolud ja pinged ettevõttele probleemiks või mitte.

Kuivõrd arvulisi mõõtetulemusi võib koguneda palju, siis on kõige ülevaatlikumad mõõtetulemused graafilisel kujul. Mõõtepunktideks peaks olema alajaama 0,4 kV jaotla või ettevõtte peakilbi latid või klemmid ning kondensaatorseadme voolu mõõtmisel selle kaablihood.

Elektrisüsteemi harmooniliste voolude ja pingete uurimine peaks sisaldama järgmisi mõõtmisi, katseid ja saadud mõõtetulemuste analüüsi. Registreeritavad parameetrid ja talitlused on järgmised.

1. Trafo voolu ja pinge harmooniliste kogumoonutuste  $THD_i$  ja  $THD_u$  väärtuste registreerimine ajas 1 s keskmistena kondensaatorseadme astmete järjestikulisel sisselülitamisel. Saadud tulemuste graafilisel esitamisel selgub, kas harmooniliste tase süsteemis kondensaatorite lülitamisel muutub ja kui muutub, siis millistes piirides. Kui harmooniliste tase kasvab oluliselt (näiteks 2 korda või enam), siis võib esineda probleeme.
2. Trafo voolu ja pinge harmooniliste spekter väljalülitatud kondensaatorseadmetega olukorras, üksikute harmooniliste väärtused suhtelistes ühikutes ja absoluutväärtustena amprites ja voltides. Soovitav registreerida ajas näiteks 30 min vältel, et näha võimalikke muutusi ja muutumisvahemikku. See mõõte-

tulemus näitab ära süsteemis esinevad vooluharmonilised, mida saab kasutada elektrisüsteemi mudelis harmooniliste vooluallikate väärtustena.

3. Trafo voolu ja kondensaatorseadme voolu spektrid igal kondensaatorseadme astmel. See mõõtetulemus näitab ära võimalikud resonantsid süsteemis ja süsteemi resonantssagedused kondensaatorseadme erinevatel astmetel. Resonantsi üheks tunnuseks on harmooniliste voolude oluline (tavaliselt 2- kuni 5-kordne) suurenemine võrreldes süsteemi olukorraga, kus kondensaatorseade on välja lülitatud. Teiseks tunnuseks on see, kui harmooniline vool on ligikaudu sama suurusega nii trafo voolus kui ka kondensaatorseadme voolus.
4. Uuritavad harmooniliste järgud trafo voolus peaksid olema 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19 ja 23 ning lisaks kogumoonutused  $THD_i$ . Kondensaatorseadme voolus on 3-ga kordse järguga harmoonilised voolud suhteliselt väikesed ja seetõttu võib 3-nda harmoonilise jätta välja. Sagedamini esinevad suured voolud harmoonilistel sagedustel  $h5$ ,  $h7$ ,  $h11$ ,  $h13$  ja  $h17$ .
5. Toitepinge harmoonilised spektrid lõpuni sisselülitatud kondensaatorseadmega. See näitab, kas mõni harmoonilistest pingetest võib olla liiga kõrge.
6. Resonantsi kahtluse korral peaks trafo voolus ja kondensaatorseadme voolus registreerima tavaliselt domineerivate vooluharmoniliste 1 s keskmised väärtused näiteks 30 min vältel erinevates olukordades, kus on sisse lülitatud just antud süsteemi teatud resonantssagedusele vastav arv kondensatoreid. Tavaliselt võivad sellised harmoonilised sagedused olla  $h5$ ,  $h7$ ,  $h11$  ja  $h13$ , aga mõnel juhul ka  $h17$ ,  $h19$  ja  $h23$ .
7. Trafo voolu ja kondensaatorseadme voolu spekter 1 s keskmistena näiteks 60 min vältel kondensaatorseadme automaatreguleerimisel, et välja selgitada episoodiliselt esinevad resonantsiolukorrad, mis võivad olla lühiajalised (näiteks mõni minut), aga suure ulatusega (kuni 80%).
8. Voolu- ja pingekõvera kujud ostsillogrammidena soovitatavalt kolmes olukorras – väljalülitatud kondensaatorseadmega, lõpuni sisselülitatud kondensaatorseadmega ja resonantsiolukorras juhul, kui resonants süsteemis esineb.
9. Harmoonilised voolud väljalülitatud kondensaatorseadmega erinevate tööseadmete toiteahelates (kaablites), harmooniliste kogumoonutuste väärtused suhtelistes ühikutes ja üksikute harmooniliste voolude absoluutväärtused amprites. Need mõõtetulemused näitavad ära süsteemi suuremad harmooniliste voolude allikad.

Ülalloetletud mõõtetulemuste uurimisega on võimalik hinnata, kas harmoonilised voolud ja pinged võivad põhjustada probleeme ja olulisi lisakadusid antud elektrisüsteemis, kas ilma filterreaktoriteta kondensaatorseadme kasutamine toob rohkem kasu või kahju, millised peaks olema regulaatori sätted, millised on resonantssagedused ja millistel sagedustel võivad voolud ja pinged ebasoovitavalt suureneada. Samuti saab hinnata, milline on kondensaatorseadme mõju pingeniivoole ja tarbitavale aktiivvõimsusele süsteemis.

## 6.6 Harmooniliste moonutuste vähendamise võimalused

Kuna elektrisüsteemi täiendamine või rekonstrueerimine on seotud suurte kuludega, siis on oluline valida harmooniliste ja resonantside probleemile sobiv lahendus. Antud probleemi on uuritud paljudes töödes [9, 39, 47, 55, 56, 57, 79, 99, 108]. Tavapärase lahendusena pakutakse filterreaktoritega kondensaatorseadet, kuid see lahendus võib olla suhteliselt kulukas ja mõnel juhul (näiteks suurte vooluharmooniliste korral) kaasa tuua ka arvestatavad lisakaod reaktorites.

Üldjuhul on võimalik valida harmooniliste moonutuste probleemile lahendusi alltoodute hulgast.

1. Toitetrafo võimsuse suurendamine ja/või toiteliini (toitekaabli) ristlõike suurendamine. Trafo mähiste ühendusskeemi valik vältimaks 3-ga kordsete harmooniliste sulgumist trafos.
2. Kõrge harmooniliste voolude tasemega muundurite (s.o ilma silumisreaktorita 6-pulsilised alaldid ja muundurid) väljavahetamine 12-pulsiliste vastu, mis on varustatud voolukuju silumisreaktoriga või harmooniliste passiivfiltriga.
3. Jadareaktori lülitamine pulsilaiusmodulatsiooniga (PWM) ajamite toiteahelasse.
4. Reaktiivvõimsuse kompensatsiooni kasutamine sellisel, et arvestatakse selle kõiki mõjusid elektritarbimise ja voolu ning pinge kvaliteedi parameetritele kompleksselt, st kõiki aspekte. Automaatse kondensaatorseadme varustamine filterreaktoritega ja/või selle regulaatori sätete valik, astmete arvu ja võimsuse ning koguvõimsuse valik annab siin võimalusi, et saavutada antud süsteemis optimaalne tulemus.
5. Harmooniliste passiivfiltrite paigaldamine elektrisüsteemi.
6. Harmooniliste voolude kompenseerimine aktiivfiltriga.

Töötava ettevõtte puhul on muudatused elektrisüsteemis seotud suurte kuludega ja siis ei ole enam palju võimalusi olukorda muuta, kuivõrd seadmed on juba paigaldatud. Siiski esineb olukordi, kus kas lisakadude vähendamiseks või seadmete tõrgeteta töö kindlustamiseks on soovitatav vähendada harmooniliste moonutuste taset. Näiteks olukorras, kus toitepinge moonutused olid  $THD_u \approx 18\%$  ja sellise moonutatud pinge puhul ei töötanud stabiilselt kontrollid, mis kasutas sünkroniseerimist pinge järgi.

## 6.7 Sildavad passiivfiltrid ehk filterkondensaatorseadmed

Paralleelresonantsi vältimiseks 0,4 kV elektrisüsteemides ja kondensaatorite kaitseks liigkoormuse eest kasutatakse kondensaatoriga jadalülituses filterreaktoreid, mis moodustavad passiivfiltri jadaresonantsiahela. Passiivfiltri tegelik koormus sõltub harmoonilistest vooludest ja pingetest elektrisüsteemis. Harmooniliste moonutuste

kõrge taseme juures võib esineda ka filtri liigkoormus, eriti reaktoris. Seetõttu tuleb kontrollida, kas filtri koormus on lubatav.

Kasutatakse kahte tüüpi passiivfiltreid – resonantshäälestusega ja lahkahäälestusega. Passiivfilter võib olla häälestatud mingile kindlale harmoonilisele sagedusele (näiteks 3-s, 5-s, 7-s, 11-s), sel juhul on tegu resonantshäälestusega filtriga (*tuned harmonic filter*). Enam kasutatakse lahkahäälestusega filterkondensaatorseadmeid (*detuned harmonic filter*), kus filtri resonantssagedus on valitud mingile harmooniliste vahelisele sagedusele. Põhjuseks on asjaolu, et resonantshäälestusega filter võib sattuda liigkoormuse alla juhul, kui filterseadme võimsus ei vasta antud süsteemi harmoonilise voolu allikatele.

Passiivfiltri  $LC$ -ahelas on kondensaatoriga jadamisi reaktor. Sellel ahelal on teatav omavõnkesagedus ehk resonantssagedus, mis on arvatav kondensaatori mahtuvuse ja reaktori induktiivsuse kaudu nn Thomson'i valemiga:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (6.10)$$

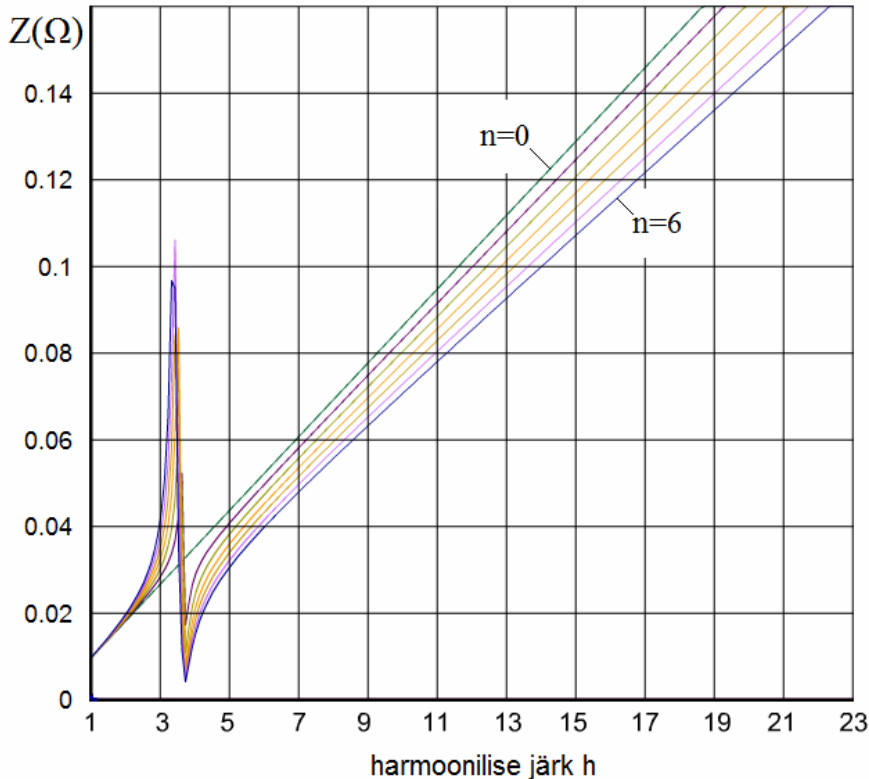
Parameetrid  $L$  ja  $C$  võivad olla valitud niiviisi, et  $LC$ -ahela resonantssagedus  $f_{res}$  langeb kokku mõne harmoonilise sagedusega, näiteks 250 Hz, 350 Hz, või valitud nii, et  $f_{res}$  jääb põhisageduse kordsete vahele, näiteks 134 Hz, 189 Hz, 214 Hz. Esimesel juhul on tegemist resonantshäälestusega harmooniliste filtriga, teisel juhul lahkahäälestusega filtriga.

Selleks, et hinnata passiivfiltri  $LC$ -ahelate mõju elektrisüsteemile, on arvatud elektrisüsteemi näivtakistus erinevatel harmoonilistel sagedustel. Selleks on kasutatud aseskeemi joonisel 6.42 ja elektrisüsteemi ning  $LC$ -ahelate reaalseid parameetreid. Arvutuse tulemusena on saadud sageduskarakteristikud erineva arvu paralleelsete  $LC$ -ahelate korral süsteemis, mis on toodud joonisel 6.41.

Niisugusel sildaval passiivfiltril on järgmine mõju elektrisüsteemi talitlusele:

- väheneb vooluharmooniliste tase süsteemi toitevoolus ja ka toitepinges;
- resonantssagedusest madalamal sagedusel kompenseerib filter ka reaktiivvõimsust.

Sagedusel, mis on madalam kui  $f_{res}$ , on ahel mahtuvuslik ja genereerib reaktiivvõimsust. Sagedusel, mis on kõrgem kui  $f_{res}$ , on ahel induktiivne ja väldib resonantsi teket süsteemis. Seega põhisagedusel toodab kondensaator reaktiivvõimsust.  $LC$ -ahela resonantssagedusel on ahela takistus minimaalne ja ahel „neelab“ vooluharmoonilisi.



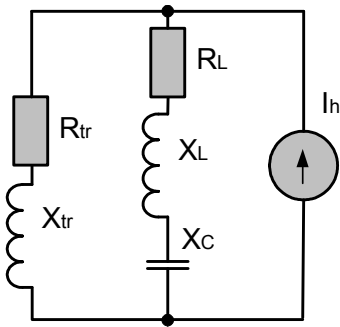
Joonis 6.41. Elektrisüsteemi näivtakistuse sagedusarakteristikud filterreaktoritega kondensaatorite ( $LC$ -ahelate) lülitamisel süsteemi, kõverad vastavad erinevale  $LC$ -ahelate arvule  $n$  ( $n = 0 \dots 6$ ); trafo nimivõimsus on 1000 kVA

### 6.7.1 Passiivfiltri parameetrite ja koostesade valik

Passiivfiltri koostesade valikul on vaja kindlaks määrata  $LC$ -ahela resonants-sagedus, reaktori nimivool, kondensaatori nimipinge ja reaktori võimsuskaod (soojuskaod). Arvutuse eesmärgiks on kontrollida, kas vool passiivfiltris jääb lubatud piiridesse, kas valitud nimipingega kondensaator on sobiv ja kui suured on aktiivvõimsuskaod reaktoris.

Nende parameetrite valikuks peaks olema teada elektrisüsteemi pinged ja voolud ning harmoonilised komponendid. Kui lähteandmeid ei ole, siis võib arvutuses lähtuda standardiga lubatud piirmääradest. Nende lähteandmetega saab arvutada passiivfiltri voolu, pinged ja võimsuskaod ning võrrelda neid reaktorile ja kondensaatorile lubatud parameetritega.

Praktikas on olukord keerukam, kuna süsteemis on  $LC$ -ahel rööbiti trafo ja koormuse ekvivalentse näivtakistusega. Seega toimub harmooniliste voolude jagunemine nendes ahelates. Kui jätta koormuse mõju arvestamata, saame arvutuseks kasutada aseskeemi joonisel 6.42, mis arvestab ka  $LC$ -ahela aktiivtakistust  $R$ . Selle aktiivtakistuse mõju resonantsipiirkonnas on oluline.



Joonis 6.42. Aseskeem trafo, sildava passiiv-filtri ja harmooniliste vooluallikaga

Arvutuses peab arvestama ka seda, et pinge põhisagedusel võib olla kuni 10% nimi-pingest kõrgem. See asjaolu suurendab märgatavalt reaktori–kondensaatori koor-musi ja seda tuleb komponentide valikul arvestada. Kuna  $LC$ -ahelad on ühendatud kolmnurka, siis 3-ga kordseid vooluharmonilisi ei arvestata.

### 6.7.2 Pingete, voolude ja võimsuskadude arvutamine passiivfiltris

Arvutuse käik on järgmine. Ahela näivtakistuse arvutamiseks erinevatel harmooni-liste sagedustel piisab, kui arvestame põhiharmoonilisega ja kõrgemate harmooni-listega järguga 5, 7, 11 ja 13. Reaktori induktiivtakistus oomides:

$$X_{L(h)} = h \cdot 2\pi f_1 \cdot L. \quad (6.11)$$

Kondensaatori mahtuvustakistuse arvutamisel arvestame, et kondensaator on ühen-datud liinipingele, aga aseskeem on ühefaasiline ja kondensaator on faasipingel, sel juhul aseskeemi mahtuvustakistus oomides:

$$X_{C(h)} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{h \cdot 2\pi f_1 \cdot C}. \quad (6.12)$$

Ahela aktiivtakistuse saame lähtudes reaktori kaovõimsusest, mis on antud reaktori valmistaja tootekirjelduses. Ahela näivtakistus harmoonilisel sagedusel on:

$$Z_{(h)} = \sqrt{R_{(h)}^2 + (X_{L(h)} - X_{C(h)})^2}. \quad (6.13)$$

Seejärel arvutame ahela harmoonilised voolud sageduste kaupa lähtudes pinge harmoonilistest piirväärtustest vastavalt standardile EVS-EN50160, seega näiteks  $U_5 = 13,8 \text{ V}$ ;  $U_7 = 11,5 \text{ V}$  jne:

$$I_h = \frac{U_h}{Z_h}. \quad (6.14)$$

Juhul, kui on võimalik elektrisüsteemi pinge harmooniliste komponentide väärtused mõõta, tuleks need registreerida kõige halvemas olukorras. Kui on arvatud või mõõdetud voolu harmoonilised komponendid, saame ahela voolu:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots + I_h^2}. \quad (6.15)$$

Pinge kondensaatoril saame arvutada samuti üksikute harmooniliste komponentide geomeetrilise summana:

$$U_C = \sqrt{U_1^2 + U_5^2 + U_7^2 + \dots + U_h^2}. \quad (6.16)$$

Näiteks passiivfiltri 50 kvar-189Hz/440V arvutuse tulemusena selgus, et juhul, kui toitepinges esineb kõiki pingeharmoonilisi lubatud piirmääral, on LC-ahela vool 73 A, mis on reaktori lubatud nimivoolust 68 A suurem. Seega on reaktor voolu osas ülekoormatud. Pinge kondensaatoril on 439 V.

### 6.7.3 Passiivfiltri pingete ja voolude mõõtmine ja analüüs

Käesolevas töös on uuritud passiivfiltri töötingimusi erinevates olukordades. Eesmärgiks oli selgitada välja pingete ja voolude võimalikud piirväärtused ja hinnata vajalike varutegurite piisavust, samuti võimsuskadusid passiivfiltris. Samuti on võrreldud kondensaatori voolu spektrit tööstusettevõtte elektrisüsteemis ilma reaktorita ja koos reaktoriga lülituses. Registreerivateks mõõtmisteks kasutati elektrikvaliteedi analüsaatorit Fluke 434. Uuringuteks kasutati lihtsat üheastmelist filterseadet, mis koosneb kondensaatorist, terassüdamikuga reaktorist, kontaktorist ja sularitest ning on monteeritud sundjahutusega kilpi. Filtri nimivõimsus on 21 kvar ja resonantssagedus 195 Hz. Mõõtmised on läbi viidud kaablitööstuse ettevõttes AS Draka Cables, kus on kasutusel suure võimsusega alalisvooluajamid.

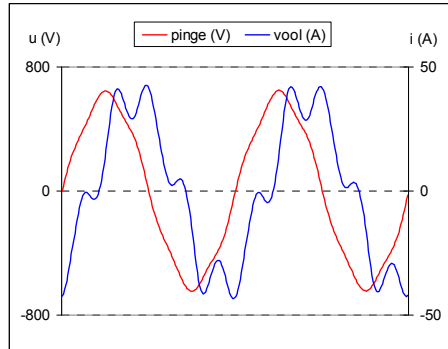
Filtri voolu mõõdetud harmooniliste spekter on toodud joonisel 6.44, kust selgub, et filtri voolus domineerib 5-s harmooniline, moonutuste tase filtri voolus  $THD_i$  on ca 40%. Voolus on harmoonilisi kuni järguni  $h_{11}$ , kõrgematel sagedustel on voolude osa alla 1%. Peamiselt on voolus 5-s harmooniline, see on näha ka voolu-kõvera kujus joonisel 6.45. Samuti on 5-s harmooniline domineeriv kondensaatori pinges joonisel 6.46. Ajas on kondensaatori pinge muutuv, selle maksimumid võivad ulatuda antud juhul kuni 440...450 voldini, vt joonis 6.47.

Joonisel 6.48 on toodud filtri voolu muutused ajas, selgub, et filtri vool sõltub tugevasti tööseadme (kaabliisone tõmbeliin) talitlusest ja võib teatud olukordades olla nimivoolust kuni 40% suurem. Neis olukordades on filtri reaktor ülekoormatud ja kuumeneb kiiresti. Keskmiselt on filtri voolus harmooniliste moonutuste osakaal 40...60%, see kõigub pidevalt sõltuvalt tööseadme muunduri (harmooniliste allika) talitlusest ja on vahemikus 10...75%, joonised 6.49 ja 6.50. Võrdluseks on joonisel 6.51 toodud sama võimsusega kondensaatori voolu spekter ilma filterreaktorita ja koos filterreaktoriga, selles on voolumoonutusi ca 20% ja võrreldaval määral esineb kõiki harmoonilisi voolusid järguga  $h_5, h_7, h_{11}, h_{13}, h_{17}, h_{19}$  ja  $h_{23}$ .

HARMONICS TABLE			
Amp	L1	L2	L3
THD% <sub>f</sub>	43.2	38.1	38.9
H3% <sub>f</sub>	3.3	2.0	2.6
H5% <sub>f</sub>	39.6	35.0	37.7
H7% <sub>f</sub>	4.6	4.1	4.4
H11% <sub>f</sub>	2.6	2.3	2.8
H13% <sub>f</sub>	0.5	0.5	0.5
H17% <sub>f</sub>	0.2	0.2	0.2
H19% <sub>f</sub>	0.1	0.1	0.1

05/27/11 12:56:29 398U 50Hz 3Ø DELTA EN50160

Joonis 6.44. Filtri voolu spekter, filtri nimivool on  $3 \times 28$  A, domineerib 5-s harmooniline

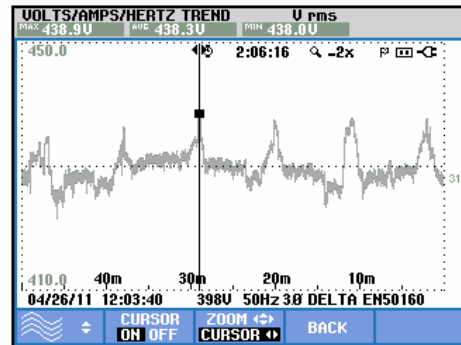


Joonis 6.45. Pingekõvera ja voolukõvera kuju filtri kondensaatori klemmidel

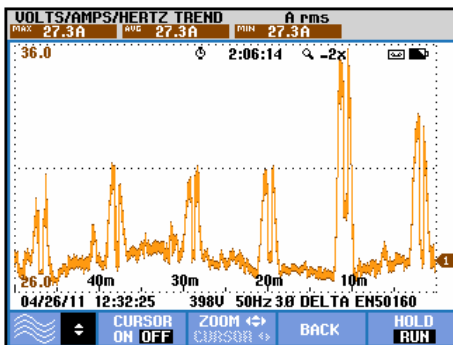
HARMONICS TABLE			
Volt	L12	L23	L31
THD% <sub>r</sub>	5.9	5.4	6.0
H3% <sub>r</sub>	0.6	0.8	1.2
H5% <sub>r</sub>	5.3	5.0	5.5
H7% <sub>r</sub>	0.4	0.4	0.5
H11% <sub>r</sub>	0.3	0.3	0.3
H13% <sub>r</sub>	0.0	0.0	0.0
H17% <sub>r</sub>	0.0	0.0	0.0
H19% <sub>r</sub>	0.0	0.0	0.0

04/26/11 10:21:20 398U 50Hz 3Ø DELTA EN50160

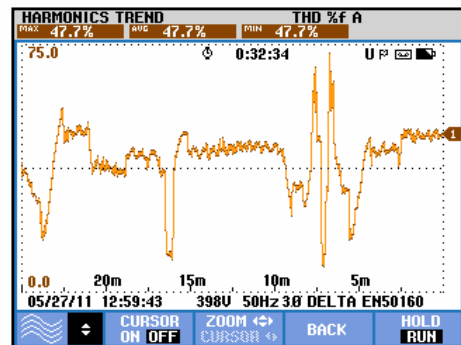
Joonis 6.46. Filtri kondensaatori liinipingete spekter, pinges domineerib 5-s harmooniline



Joonis 6.47. Kondensaatori liinipinge filtris AL-tõmbeliini töö ajal, kondensaatori pinge maksimum on 439 V



Joonis 6.48. Filtri voolu efektiivväärtuse muutused ajas, filtri nimivool  $I_{nimi} = 3 \times 28$  A, maksimumid kuni 36 A vastavad liigkoormusele



Joonis 6.49. Filtri voolu harmoonilised kogumoonutused ajas AL-tõmbeliini töö ajal, moonutused voolus  $THD_i$  vahemikus 10...75%



HARMONICS TABLE			
Amp	L1	L2	L3
THD% <sub>f</sub>	57.1	50.6	54.8
H3% <sub>f</sub>	3.4	2.0	2.6
H5% <sub>f</sub>	55.3	48.5	53.7
H7% <sub>f</sub>	5.2	4.6	5.9
H11% <sub>f</sub>	1.7	1.6	2.0
H13% <sub>f</sub>	0.3	0.3	0.3
H17% <sub>f</sub>	0.2	0.2	0.2
H19% <sub>f</sub>	0.1	0.1	0.1

05/27/11 12:25:15 398U 50Hz 3Ø DELTA ENS0160

U A W HOLD RUN  
U&A BACK TREND

Joonis 6.50. Kondensaatori voolu spekter reaktoriga lülituses, nimivool 28 A, domineerib 5-s harmooniline, vähesel määral esinevad veel 3-s, 7-s ja 11-s harmooniline

HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N
THD% <sub>f</sub>	21.4	20.3	18.4	251.9
H5% <sub>f</sub>	4.9	4.6	5.1	43.5
H7% <sub>f</sub>	5.9	5.7	5.8	42.5
H11% <sub>f</sub>	5.6	5.0	4.9	44.4
H13% <sub>f</sub>	5.5	5.0	4.8	40.0
H17% <sub>f</sub>	7.7	7.5	6.8	37.2
H19% <sub>f</sub>	6.6	6.6	6.3	39.9
H23% <sub>f</sub>	8.2	7.8	6.1	39.5

05/24/11 11:55:35 230U 50Hz 3Ø WYE ENS0160

U A W HOLD RUN  
U&A BACK TREND

Joonis 6.51. Kondensaatori voolu spekter ilma reaktorita lülituses, spektris esineb kõrgemaid harmoonilisi kuni 35-nda järguni, kondensaatori nimivool 30 A

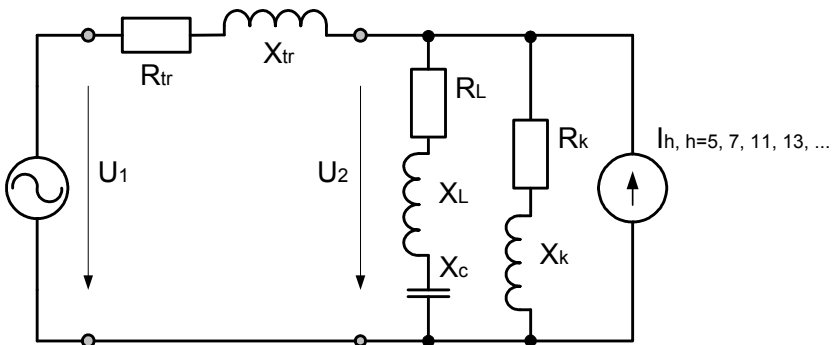
### Järeldused filterlülituses kondensaatorseadme mõõtmistest

- Filterlülituses kondensaatori voolu spekter erineb oluliselt ilma reaktorita kondensaatori voolu spektrist. Kui võrrelda ligikaudu sama võimsusega ilma reaktorita kondensaatorit ja reaktoriga kondensaatorit samas 0,4 kV elektrisüsteemis, siis selgub, et ilma reaktorita kondensaatori voolus esineb erinevat järku kõrgemaid harmoonilisi paljudel sagedustel kuni 35-nda järguni ning harmoonilised järguga 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29 ja 35 on kõik võrreldaval tasemel, ükski neist ei ole oluliselt domineeriv. Reaktoriga kondensaatori voolus domineerib 5-s harmooniline, tunduvalt madalamad on harmoonilised järguga 3, 7 ja 11. Harmoonilisest järguga 11 kõrgemate harmooniliste osa jääb alla 1%. Seda näitavad vastavad spektrid joonistel 6.44 ja 6.46 ning voolukõvera ostsilogramm joonisel 6.45. Seega filterseadmes, mille resonantssagedus on 5-nda harmoonilise läheduses, domineerib voolus 5-s harmooniline, ilma reaktorita kondensaatori voolus samal võimsusel esineb suur hulk kõrgemaid harmoonilisi.
- Filtri reaktori voolu efektiivväärtus ei ole ajas püsiv, vaid muutub pidevalt, kusjuures episoodiliselt *ca* mõne minuti vältel esineb sõltuvalt harmooniliste allika talitlusest reaktori nimivoolust tunduvalt suuremaid väärtusi – kuni 40%, nagu on näidatud joonisel 6.48. Antud juhul on näha voolu tsüklilised suurenemised, mis vastavad kaabliisooni tõmbeliini alalisvooluajami talitlusele trumli vahetuse ajal. Samuti muutub suurtes piirides filtri voolu harmooniliste kogumoonutus. Nagu selgub joonisel 6.49, muutub filtri voolu  $THD_i$  vahemikus 10...75%.
- Kondensaatori liinipingete efektiivväärtused ei ole samuti ajas püsivad, vaid muutuvad ja samuti esinevad tsükliliselt maksimumid, kus pinge tõusis ligikaudu 450 voldini. Ilmselt võib ajutiselt esineda ka kõrgemaid väärtusi. See kinnitab asjaolu, et kondensaatorid filterseadmes peavad olema piisava varuga nimipinge osas, antud juhul on kondensaatori nimipinge valitud 480 V.

- Kõrge harmooniliste tasemega elektrisüsteemis võib episoodiliselt esineda filterseadme ülekoormus, kus vool ületab reaktori nimivoolu. Sel juhul on ka reaktori võimsuskao suured ja reaktor võib üle kuumeneda. Seda tuleb arvestada filterseadme parameetrite ja koosteosade valikul ning samuti sundjahutuse lahenduse valikul. Seetõttu on kõrge harmooniliste tasemega elektrisüsteemis vaja teada tegelike harmooniliste voolude väärtusi enne filterseadme projekteerimist. Kui filterseadme võimsus on harmooniliste vooluallikate võimsusest väiksem, võib filterseade olla ülekoormatud ja tugevasti kuumeneda, kuna voolud on suuremad kui seadme nimivool.
- Filterseade vähendab harmooniliste kogumoonutuste taset  $THD_u$  elektrisüsteemis peamiselt seetõttu, et süsteemis väheneb pinge 5-s harmooniline. Kuna 5-s harmooniline on sageli ka domineeriv, on filtri toime harmooniliste kogumoonutuste vähendamisel märgatav. Antud filtril 11-ndast kõrgematel sagedustel mingit mõju harmooniliste tasemele süsteemis pole.

## 6.8 Ettevõtte elektrisüsteemi mudel pingete, voolude ja sagedus-karakteristiku arvutamiseks vooluharmooniliste arvessevõtmisega

Reaalse ettevõtte elektrisüsteemi aseskeemis tuleb arvesse võtta süsteemi põhilised osad. Selleks on antud juhul kasutatud aseskeemi joonisel 6.52. Aseskeem sisaldab põhisageduse toiteallikat, samuti harmooniliste vooluallikat. Harmooniliste voolude allika poolt vaadates on filtri  $LC$ -jadaahelaga rööbiti trafo aktiiv- ja induktiivtakistus ning samuti koormuse aktiiv- ja induktiivtakistus. See mõjutab ahela ekvivalentset näivtakistust erinevatel sagedustel. Osa vooluharmoonilistest sulgub mitte ainult läbi passiivfiltri  $LC$ -ahela, vaid ka läbi trafo, kuna trafo takistus on suhteliselt väike. Seega väheneb  $LC$ -ahela koormus ja vähenevad ka pinged kondensaatoril.

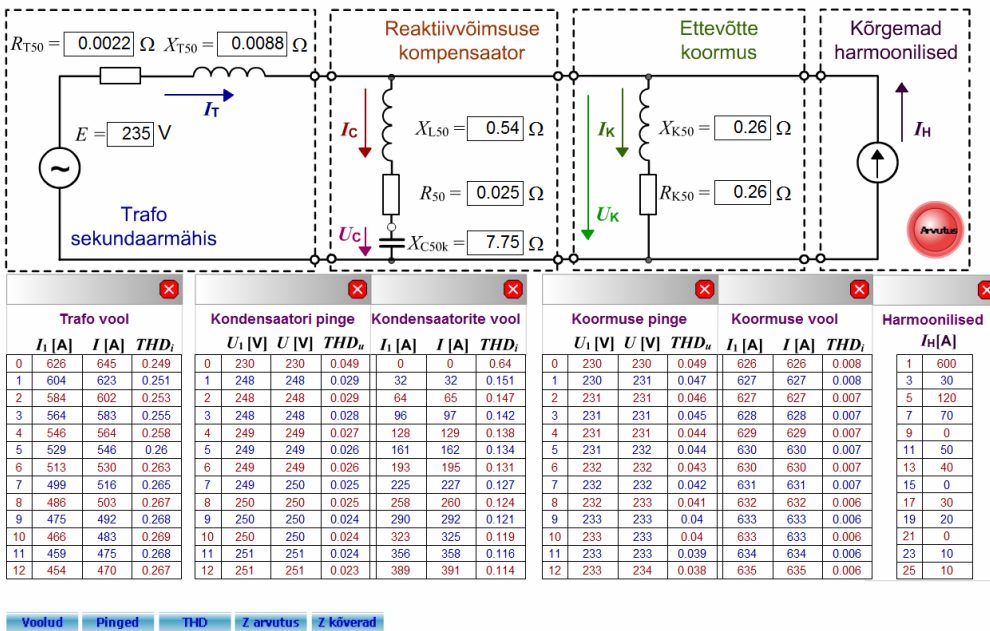


Joonis 6.52. Ettevõtte 0,4 kV elektrisüsteemi mudel pingete ja voolude arvutamiseks süsteemis harmooniliste voolude allikaga

Aseskeemi mudeli kasutamiseks ja arvutustulemuste võrdlemiseks mõõtetulemustega on vaja teada järgmisi parameetreid: koormuse aktiiv- ja reaktiivvõimsus; toitepinge tase koormusvabas talitluses; toitepinge harmoonilised moonutused; voolud põhisagedusel ja harmoonilistel sagedustel trafoahelas ja kondensaatorseadme ahelas ning trafo parameetrid. Teades neid lähteandmeid saab antud mudeliga

arvutada pinged, voolud ja võimsused, samuti pinge- ja voolu harmoonilised moonutused erinevates koormusolukordades ja erineva lahendusega reaktiivvõimsuse kompensatsiooniks. Arvutusmudel on väga kasutajasõbralik ja sobiv igale elektriinsenerile.

Näitena on järgnevalt toodud EITSA (Eesti Infotehnoloogia Sihtasutus) õpiobjektide repositooriumis asuv elektrisüsteemi mudel, mis võimaldab arvutada ja graafiliselt esitada süsteemi sageduskarakteristiku ning voolud ja pinged elektrisüsteemis harmooniliste voolude arvessevõtmisega. Joonisel 6.53 toodud mudeli arvutusnäites on kasutatud süsteemi reaalseid parameetreid ja harmooniliste voolude suurusi. Arvutusnäitest selgub, et filterkondensaatorite lülitamisega antud süsteemi vähenevad toitepinge moonutused  $THD_u$  4,9-lt kuni 3,8 protsendile. Trafo voolus on moonutuste osa  $THD_i$  25...27%. Mudelis tehtud arvutuste tulemusi saab võrrelda katsetes mõõdetud pinge, voolu ja moonutuste väärtustega, samuti võimaldab mudel arvutada reaktiivvõimsuse kompensatsiooniks vajalike seadmete parameetrid ja hinnata varutegurite piisavust.



Joonis 6.53. Ettevõtte elektrisüsteemi mudel pingete, voolude, harmooniliste moonutuste ja näivtakistuse sageduskarakteristiku arvutamiseks harmooniliste voolude arvessevõtmisega

Toodud aseskeem pole siiski harmooniliste voolude osas täpne, sest jätab arvestamata selle, et elektrisüsteem on tegelikult kolmefaasiline. Seega ei saa me õiget tulemust 3-nda ja kolmenda kordsete harmooniliste osas. Sageli on aga 3-ga kordsete harmooniliste osakaal ettevõtete elektrisüsteemides väike ja selle mitteamvestamine suurt viga ei põhjusta.

## 6.9 Kokkuvõte ja järeldused

- Praktilistes inseneriarvutustes pole võimalik arvesse võtta kõiki ettevõtte elektrisüsteemi seadmeid ja nende erinevaid koormusi. Sellepärast on vaja lihtsat aseskeemi, mis võtaks arvesse olulised parameetrid ja tegelikud koormused ning oleks piisavalt täpne voolude, pingete ja võimsuste arvutamisel.
- Seoses mittelineaarsete elektriseadmete kasutamisega suurenevad ka voolu- ja pingekõvera moonutused ja seega harmoonilised voolud ja pinged elektrisüsteemides. Süsteemi talitluse optimeerimine ja seadmete valik eeldab harmooniliste voolude, pingete ja võimalike resonantsinähtuste arvestamist.
- Antud peatükis on toodud näiteid elektrisüsteemi talitluse uurimise meetodikast kondensaatorseadmete kasutamisel ning esitatud mõõtmiste ja katsete läbi viimise meetodika harmooniliste voolude, pingete ja resonantside uurimiseks 0,4 kV elektrisüsteemides.
- Harmooniliste voolude ja pingete arvessevõtmiseks on välja töötatud elektrisüsteemi lihtsustatud arvutusmudel. Mudel võtab arvesse toitetrafo, koormuse ja kondensaatorseadme parameetrid. Harmoonilised voolud antakse ette igal harmoonilisel sagedusel eraldi lähtudes tegelikest mõõtetulemustest. Teades elektrisüsteemi parameetreid saame arvutada voolud ja pinged süsteemis ning uurida resonantsitingimusi.
- Ettevõtte elektrisüsteemi näivtakistuse sagedusarakteristik on ülevaatlik ja oluline juhul, kui süsteemis on kondensaatorid ja harmooniliste voolude allikad. Harmooniliste voolude ja pingete suurus süsteemis oleneb mittelineaarsete tarbijate võimsusest ning süsteemi ekvivalentsest näivtakistusest.
- Reaktiivvõimsuse kompensatsioonil kondensaatorseadmetega on mitmed üldtuntud positiivsed mõjud, kuid tähelepanu vajavad seejuures ka negatiivsed mõjud. Juhul, kui süsteemis on küllalt suur osakaal mittelineaarsetel tarbijatel, võib kondensaatorite sisselülitamine oluliselt suurendada harmoonilisi voolusid ja pingeid. Lisaks võivad teatud talitlustes tekkida vooluresonantsid, kus harmoonilised voolud trafos ja kondensaatorseadmes ning harmoonilised pinged kogu süsteemis suurenevad lubamatul määral. Resonantsid võivad esineda mitte ainult 5-nda harmoonilise sagedusel, vaid ka kõrgematel sagedustel nagu 7-s, 11-s, 17-s ja 23-s harmooniline. Kokkuvõttes võivad võimsuskadod kondensaatorite kasutamisel hoopis suurenedada, mitte väheneda.
- Võimsuskadod harmoonilistest vooludest võivad 0,4 kV elektrisüsteemis olla piisavalt suured, et väärida uurimist. Juhul, kui voolude ja pingete harmoonilised moonutused on suured, siis võivad harmoonilised lisakaod olla näiteks 3...4% tarbitavast võimsusest.
- Ettevõtte elektrisüsteemi mudelit on soovitatav edasi arendada kahes suunas – esiteks arendada välja kolmefaasiline mudel, et võtta õigesti arvesse ka 3-ga kordsed harmoonilised voolud ja pinged, ning teiseks tuua mudelisse sisse võimsuskadude ahelad ja nende arvutamise algoritmid.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. Abreu J. P. G., Emanuel A. E. Induction motors loss of life due to voltage imbalance and harmonics. 9-th International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP 2000. Proceedings, USA, pp. 75...80.
2. American National Standard for Electric Power Systems and Equipment-Voltage Ratings (60 Hertz), ANSI Standard C84.1-2006.
3. Baghzouz Y., Quist C. Determination of static load models from LTC and capacitor switching tests. Proc. of IEEE PES Summer Meeting, July 2000, pp. 389...394.
4. Balda J. C., Barnes T.M. and more. Effects of Harmonics on Equipment. Report of the IEEE Task Force on the Effects of Harmonics on Equipment. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 2. April 1993.
5. Bhattacharyya S., Myrzik J. M. A., Kling W. L. Consequences of Poor Power Quality – Overview. Technical University Eindhoven, the Netherlands, 2007, pp. 651...656.
6. Bhattacharyya S., Wang Z., Gobben J. F. G., Myrzik J. M. A., Kling W. L. Analysis of Power Quality Performance of the Dutch Medium and Low Voltage Grids. 13<sup>th</sup> International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP 2008. pp. 1...6.
7. Bendre A., Divan D., Kranz W., Brumsickle W. Are Voltage Sags Destroying Equipment? IEEE Industry Applications Magazine, No 4 2006, pp. 12...21.
8. Blooming T. M. Capacitor Failure Analyses. IEEE Industry Applications Magazine, Sept/Oct 2006, pp. 38...48.
9. Blooming T. M., Carnovale D. J. Harmonic Convergence. IEEE Industry Applications Magazine, Jan/Feb 2007, pp. 21...27.
10. Bollen, M. H. J. Understanding Power Quality Problems. Voltage Sags and Interruptions. IEEE Press. John Wiley & Sons, Inc., 2000, 543 p.
11. Bose Bimal K. The Past, Present, and Future of Power Electronics. IEEE Industrial Electronics Magazine, June 2009, pp. 7...14.
12. Caramia P., Verde, P. Cost-Related Harmonic Limits. Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE 2000, pp. 2846...2851.
13. Caramia P., Carpinelli, G., Losi A., Russo A., Verde P. A Simplified Method for the Probabilistic Evaluation of the Economical Damage due to Harmonic Losses. 8<sup>th</sup> International Conference on Harmonics and Quality of Power ICHQP'98, Athens, Greece, October 14-16, 1998.
14. Carpinelli, G., Caramia, P., Di Vito, E., Losi, A. and Verde, P. Probabilistic Evaluation of the Economical Damage due to Harmonic losses in Industrial Energy System. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, issue 2, April 1996, pp. 1021...1031.
15. Cummings P. G., Estimating the Effect of System Harmonics on Losses and Temperature Rise of Squirrel-Cage Motors. IEEE, 32<sup>nd</sup> Petroleum and Chemical Ind. Conf. Houston, TX, Sept. 1985.
16. Dan, A., Raisz, D. A Novel Measurement-Based Low-Voltage Loss Estimation Method. 6<sup>th</sup> Electric Power Quality and Supply Reliability Conference Proceedings, Pärnu, 2008. pp. 85...92.
17. David A., Maire J. M. Dessoude. Influence of Voltage Dips and Sags Characteristics on Electrical Machines and Drives. PQA 1994, Amsterdam.
18. Degeneff R. C., Barss R., Carnovale D., Raedy S. Reducing the Effect of Sags and Momentary Interruptions. 2000 IEEE, pp. 397...403.

19. Desment J., Vanalme G., Debruyne C., Vandevelde L. Influence of Harmonic Currents on Cable Losses for Different Grid Configurations. 14th Intern. Conf. on Harmonics and Quality of Power, ICHQP 2010, pp. 1...6.
20. Desment J., Vanalme G., Belmans R., Van Dommelent D. Simulation of Losses in LV Cables due to Nonlinear Loads. IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC 2008, Greece, 15...19 June 2008, pp. 785...790.
21. Desment J. Study and Analyses of cable losses in LV cables under harmonic conditions, October 2008, ISBN 978-90-5682-962-9, Ph.D. dissertation.
22. Dugan R. C. Electrical Power Systems Quality. McGraw-Hill Professional; 2-d edition, 2002, 528 p.
23. Elmoudi A. A. Evaluation of Power System Harmonic Effects on Transformers. Hot Spot Calculation and Loss of Life Estimation. Doct. Dis. Helsinki TU, Espoo, 2006.
24. Eesti Standard EVS-EN 50160:2007. Elektri jaotusvõrkude pinge tunnussuurused. Eesti Standardikeskus, 2008.
25. Eesti Standard EVS-EN 69831-1:2001/A1:2003. Iseparanevat tüüpi paralleeljõukondensaatorid vahelduvvoolusüsteemidele nimipingega kuni 1 kV. Osa 1. Üldnõuded. Talitlus, katsetamine ja nimisuurused. Paigaldamise ja käidu juhised, 2003.
26. Fernandes F.M., Chandramohan N.P.S. Influence of Power Factor Compensating Capacitors on Estimation of Harmonic Distortion. 9th Int. Conference on Electrical Power Quality and Utilisation. Barcelona, 9–11 October 2007.
27. Feng X., Peterson W., Yang F., Wickramasekara G. M., Finney J. Smarter grids are more efficient. Voltage and Var Optimization Reduces Energy losses and peak demands. ABB Review 3/2009, pp. 33...37.
28. Fuchs E. F., Roesler D. J., Masoum M. A. S. Are Harmonic Recommendations According to IEEE and IEC Too Restrictive?. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 4, October 2004.
29. Fuchs E. F., Roesler D. J., Kovacs K. P. Aging of Electrical Appliances due to Harmonics of the Power System's Voltage. IEEE Trans. on Power Delivery, No.3, July 1986, pp. 301...307.
30. Fuchs E. F., Masoum M.A.S.: Power Quality in Power Systems and Electrical Machines. Elsevier Academic Press 2008, 638p.
31. Fuchsloch J., Finley W., Reinhard W. W. The next generation motor. Designing a new approach to improve the energy efficiency of NEMA Premium motors. IEEE Industry Applications Mag. Jan/Feb 2008. pp. 37–43.
32. Fuentes R., Quezada J. Relevant Aspects for Harmonics Evaluation of Industrial Plants: a Scope from Real Cases. 9-th International Conference on Harmonics and Quality of Power ICHQP 2000. Proceedings pp. 195...202.
33. Ghijselen J.A., Ryckaert W.R., Melkebeek J.A., Required load behaviour for power quality improvement. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, vol.2, pp.998-1003, 2002.
34. Glinkowski M. T., Kalinowsky S., Salon S./Induction Motor Loads With Adjustable Speed Drives and Their Effect on the Power System. Consolidated Edison of New York. 9-th ICHQP 2000 USA. pp. 602-607.
35. GOST 13109: Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in public electrical systems. State Standard of the Russian Federation, 2007.

36. Gothelf N. Power Quality Effects of Compact Fluorocent Lamps (CFL) – A Field Study. Right Light 4, Volume 2. NUTEK, Stocholm, 1997.
37. Grigsby L. L. (editor). Electric Power Engineering Handbook. Second edition. Electric Power Generation, Transmission and Distribution. CRC Press, 2007.
38. Heydt G. T. Analyses and Design of Power Acceptability Curves for Industrial Loads. Power Systems Engineering Research Centre, PSERC publication No 01-28. Cornell University, New York 2001.
39. Hoadley F. L. Curb the Disturbance. Comparison of methods for the mitigation of line current harmonics. IEEE Industry Applications Magazine. Sept/Oct 2008, pp. 25–33.
40. IEC Standard 61000-2-4: Compatibility levels in industrial plants for low frequency conducted disturbances.
41. IEC Standard 61000-3-2: Limits for harmonic current emissions.
42. IEC Standard 61000-3-4: Limitation of emission of harmonic currents in low voltage power systems for equipment with rated current greater than 16A.
43. ITI (CBEMA) Curve Application Note. Information Technology Industry Council (ITI). <http://www.itic.org>.
44. IEEE Std 18-2002. IEEE (ANSI) Standard for Shunt Power Capacitors.
45. IEEE Std 1159-2009. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. 26 June, 2009.
46. IEEE Std C57.110-1998. IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents.
47. IEEE Std 519. IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. IEEE, New York, 1993.
48. IEEE Task Force. The Effects of Power Sustum Harmonics on Power System Equipment and Loads. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-104, Sept 1985, pp. 2555–2563.
49. Jaatinen Juhani. Pienjänniteverkon kompensointi. Hakopaino Oy Helsinki, Espoo, 1991. 142 lk.
50. Janson, K., Järvik, J., Vinnal, T. (2002). Simple and Compatible Resonant Converter for Supplying Electrical Arc. In: Proceedings of the Int. Conf. Power Electronics (PCIM 2002), Shanghai, China, 2002, pp. 232–237.
51. Jou H.-L., Wu J.-C., Wu K.-D., Shen N.-T., Chang Y.-J. Simplified method for protecting the power capacitor from over-voltage/over current. Electrical Power and Energy Systems 28 2006, pp. 215–220.
52. Yamazaki K. Loss Calculation of Induction Motors Considering Harmonic Electromagnetic Field in Stator and Rotor. Electrical Engineering in Japan, Vol. 147, No. 2, 2004.
53. Yazdani-Asrami M., Mirzaie M. and Shayegani A. Calculation of Transformer Losses under Non-Sinusoidal Currents Using: Two Analytic Methods and Finite Element Analysis. World Applied Sciences Journal 9 (8): 889–897, 2010.
54. Kadel P. Utilization of the standard-voltage-range in low-voltage networks for the usage of Local-Energy- Controllers without affecting the power-quality. 9<sup>th</sup> International Conference. Electrical Power Quality and Utilisation. Barcelona, 2007.
55. Key T. and Lai J.-S. Effectiveness of Harmonic Mitigation Equipment for Commercial Office Buildings. IEEE Trans. on Ind. Applications, Vol. 33, No. 4, July/August 1997.

56. Key T. and Lai J.-S. Costs and Benefits of Harmonic Current Reduction for Switch-Mode Power Supplies in a Commercial Office Building. IEEE 1995, pp. 1101...1108.
57. Kim J.S., Kim Y.S. Series Active Power Filters to Compensate Harmonics and Reactive Power with the Direct Compensating Voltage Extraction Method in Three-Phase Four-Wire Systems. Journal of Power Electronics. A Publication of the Korean Institute of Power Electronics, 9.2009, pp. 691...699.
58. Kini P. G., Bansal R. C., Aithal R. S. Impact of voltage unbalance on the performance of three-phase induction motor. Department of Electrical and Electronics Engineering, Manipal Institute of Technology, India. The South Pacific Journal of Natural Science 24(1), 2006, pp. 45...50.
59. Kirshner D., Giorsetto P. Statistical tests of energy savings due voltage reduction. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 6, June 1984.
60. Kjølle G. H., Seljeseth H., Heggset J., Trengereid F. Quality of Supply Management by Means of Interruption Statistics and Voltage Quality Measurements. ETEP vol. 13, No. 6, November/December 2003. 373...378 p.
61. Klaić Z., Nikolovski S., Baus Z. Statistical Analysis of Voltage Sags in Distribution Network According to EN 50160 Standard – Case Study. CIRED. 19<sup>th</sup> Inter. Conf. on Electricity Distribution. Vienna, 21-24 May 2007, 4 pp.
62. Korunović L. M., Stojanović D. P. and Milanović J. V. Identification of static load characteristics based on measurements in medium-voltage distribution network. IET Gener. Transm. Distrib., 2008, (2), pp. 227...234.
63. Korunović L. M., Stojanović D. P. The Effects of Normalization of Static Load Characteristics. IEEE Bucharest Power Tech Conference 2009, Bucharest, Romania.
64. Kuchumov, L. A.: The Estimation and Optimization Algorithms of Electric Regimes in Power Supply Networks, 4<sup>th</sup> Electric Power Quality and Supply Reliability Conference Proceedings, Haapsalu, 2002.
65. Lawrence R.. Voltage Optimization: Achieving regulated, balanced voltage on 600 V distribution systems. IEEE Industry Applications Magazine. No. 5 2006, pp. 26...33.
66. Lawrence R., Monicrief B. Compatibility Saves Money. Specification Guidelines to Improve Power Quality Immunity and Reduce Plant Operating Costs. IEEE Industry Applications Magazine. Mar/Apr 2004, pp.10...17.
67. Lemsalu A. Jaotusvõrkude pingeerinevuste kontrollimise juhend ja soovitusel (Guidelines and recommendations for testing voltage variations in distribution networks), Eesti Energia Õppekombinaat, Tallinn, 1980.
68. Lockley B., Wood B., Paes R., Dewinter F. Standard 1566 for (UN) Familiar Hands. IEEE Industry Applications Magazine. Jan/Feb 2008, pp. 21...28.
69. Mains Power-Quality Effects by Electronic Lighting Equipment. European Lamp Companies Federation – ELC. Brussels. Belgium. 18 May 2009.
70. Managuli R., Baghzour Y. Voltage Dip Control During Motor Starting by Shunt Capacitors. 9-th International Conf. ICHQP, 2000. USA, pp. 260...264.
71. Maruszczky J., Lhenry M., Helinko M., Korendo Z. In Harmony. Defining global energy-efficiency standards. ABB Review 3/2009, pp. 50...55.
72. Meldorf M., Tammoja H., Treufeldt Ü., Kilter J. Jaotusvõrgud. TTÜ kirjastus. Tallinn 2007.
73. Meldorf M., Kilter J. Type Models of Electrical Network Load. Oil Shale, 2009, Vol. 26, No 3 Special, pp. 243...253.



74. Milanović J. V. Course on: Power Quality Issues in Contemporary and Future Power Networks. The University of Manchester, Manchester, UK. 25-27 January 2010.
75. Mithulananthan N., Salama M. M. A., Canizares C. A., Reeve J. Distribution system voltage regulation and var compensation for different static load models. University of Waterloo, Canada. Inter. Journal of Electrical Engineering Education 37/4. Oct. 2000.
76. Moreno-Munoz A. Power Quality. Mitigation Technologies in a Distributed Environment. Springer 2007.
77. Next-generation power quality meters. Eaton Corporation. www.eatonelectrical.com.
78. Novitskiy A., Shau H.: Energy Saving Effect due to the Voltage Reduction in Industrial Electrical Networks. PQ2010, Kuressaare, June 16–18, 2010.
79. Piel Jonathan K., Carnovale Daniel J. „Economic and Electrical Benefits of Harmonic Reduction Methods in Commercial Facilities“. Eaton Electrical Inc., USA, July 2004.
80. Raesaar P., Valtin J., Tiigimägi E. Teadustöö leping nr 479L. Eesti elektritarbimine aastatel 2005–2015. Tallinn, 2004.
81. Raesaar P. Energiamaajanduse juhtimise üldine protseduur. Esitlus, TTÜ, 2001.
82. Raesaar P. Elektrivõrgu kadudest ja nende hindamisest. TTÜ elektroenergeetika instituut. Tallinn, 2002.
83. Rebane K. Miks on keskkonnahoid objektiivselt raske? Kogumikus: Taastuvate Energiaallikate uurimine ja kasutamine, Tartu, 2002, lk. 78..82.
84. Renner H. Trends in Power Quality. Graz University of Technology. CEER workshop. Lissabon, 11. September 2008.
85. Renner H. Review of Flicker Objectives. Views of CIGRE/CIRED JWG C4.108. Graz University of Technology, Austria.
86. Risthein E. Sissejuhatus energiatehnikasse. Kirjastus Elektriajam, Tallinn 2007.
87. Ристхейн Э. М. Электроснабжение промышленных установок. М.: Энергоатомиздат. 1991.
88. Robert A./Power Quality Monitoring at the Interface Between Transmission System and Users/9-th ICHQP/2000/USA. p. 425...430.
89. Russell Michael J. The Impact of Mains Imedance on Power Quality. Presented at Power Quality 2000 (Boston, MA) on October 4, 2000.
90. Sakkos T., Sarv V. A New Low-Distorting Three-Phase Diode Rectifier Employing Optimum Ripple Power Control. CPE 2005/3.6. Gdynia. P. 1...6.
91. Salem F. J., Simmons R. A. Power Quality From A Utility Perspective. 9-th International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP 2000. Proceedings. October 14, 2000, Orlando, USA, pp 874...881.
92. Santarius P., Krejci P., Chmelikova Z., Ciganek J. Long-term Monitoring of Power Quality Parameters in Regional Distribution Networks in The Czech Republic. 13th Intern. Conf. on Harmonics and Quality of Power ICHQP 2008.
93. Seljeseth H., Sand K., Fossen K. E. Laboratory Tests of Electrical Appliances Immunity to Voltage Swells. 20<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution. Prague, 8-11 June 2009.
94. Seljeseth H., Sand K. Next generation Power Quality Management. NORDAC 2008: Conference Papers. Trondheim. SINTEF Energiforskning 2008.
95. Seljeseth H., Mogstad O. Rapid Voltage Chnges – Definition and Minimum Requirements. CIRED 2009. 8-11 June 2009, Prague.

96. Seljeseth H., Advanced large scale power quality monitoring system – The complete measurement chain. SINTEF report A13627, Norway, 2009.
97. Schmid, R. Motorwirkungsgrad und Zustandsdiagnose von Drehstrommaschinen. Voestalpine Stahl GmbH, 2011. Website: [www.voestalpine.com](http://www.voestalpine.com).
98. Eesti Statistikaamet, Aruanne KE03: Elektrienergia bilanss, 2010.
99. Steciuk P. B. Differences Among High and Low Voltage Filter Design. Northeast Power Systems, Inc., New York, Website: [www.nepsi.com](http://www.nepsi.com).
100. Styvaktakis E. Automating Power Quality Analysis. PhD thesis. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2002.
101. Stöber P.: Berücksichtigung der Spannungsabhängigkeit der Lasten in der Kurzzeitdynamik elektrischer Energieübertragungssysteme. Archiv für Elektrotechnik 73 (1990) 153–162.
102. Söderström R. Synchronized switching of MV-circuit breaker for MV-capacitor banks. ABB Switchgear, Sweden, PQA 94, Amsterdam, 1994.
103. Tiigimägi E., Raesaar P., Valtin J., Kukk E., Pihlak A. Teadustöö leping nr L 706. Elektrivõrgu kommertskadude hindamise ja tekkepiirkondade väljaselgitamise meetodika. TTÜ Elektroenergeetika instituut, 1997.
104. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. М. Энергоатомиздат, 1985. 224 стр.
105. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. Москва, Энергоатомиздат, 1994. 265 стр.
106. Vagin G. J., Orlov V. S. ja Järvik J. Ettevõtete elektrivarustuse eriküsimused. TTÜ, Tallinn, 1993.
107. Wagner, V. E. Effects of Harmonics on Equipment. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 2, April 1993.
108. Wakileh, G. J.: Power System Harmonics: Fundamentals, Analyses and Filter Design. Springer, 2001, pp. 37.
109. Verde, P. Cost of harmonic effects as meaning of standard limits. Proceedings of the 9-th International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP vol 1, 1-4 Oct. 2000, pp. 257...259.
110. Wiercx, F. K. A. M. Voltage control in distribution networks. PQA 94, C-1.03, Amsterdam, 1994.

## PUBLIKATSIOONID

1. Vinnal, T.; Kalda, H.; Mölder, H. (2011). Measurements and analyses of supply voltage magnitude and voltage variations. *In: 10th International Symposium "Topical problems in the field of electrical and power engineering. Doctoral school of energy and geotechnology". II : Pärnu, Estonia, January 10-15, 2011: (Toim.) Rain Lahtmets.* Tallinn: Estonian Society of Moritz Hermann Jacobi, 2011, 46 - 51.
2. Vinnal, T.; Janson, K.; Kalda, H.; Kütt, L. (2010). Analyses of Supply Voltage Quality, Power Consumption and Losses Affected by Shunt Capacitors for Power Factor Correction. *In: PQ2010: 7th International Conference 2010 Electric Power Quality and Supply Reliability, Conference Proceedings: 7th International Conference 2010 Electric Power Quality and Supply Reliability, Kuressaare, Estonia, June 16-18, 2010. (Toim.) Sakkos, Tiiu.* IEEE, 2010.
3. Mölder, H.; Vinnal, T.; Beldjajev, V. (2010). Harmonic losses in induction motors caused by voltage waveform distortions. *In: PQ2010: 7th International Conference 2010 Electric Power Quality and Supply Reliability, Conference Proceedings: 7th International Conference 2010 Electric Power Quality and Supply Reliability, Kuressaare, Estonia, June 16-18, 2010.* IEEE, 2010.
4. Mölder, H.; Vinnal, T.; Beldjajev, V. (2010). Analysis on AC Motor Losses due to Harmonic Levels Increase Caused by Switched Capacitor Passive Power Factor Correction. 9th International Symposium Pärnu 2010 "Topical Problems In The Field Of Electrical And Power Engineering" and "Doctoral School of Energy and Geotechnology II", Pärnu, Estonia, June 14–19, 2010 (42–46). Tallinn University of Technology
5. Vinnal, T.; Kalda, H.; Mölder, H. (2010). Harmonic Voltage and Currents in LV Industrial Power Systems, Shunt Capacitors and Additional Power Losses. *In: 9th International Symposium Pärnu 2010 "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering" and "Doctoral School of Energy and Geotechnology II", Pärnu, Estonia, June 14 - 19, 2010: (Toim.) Lahtmets, R.,* 2010, 47 - 52.
6. Vinnal, T.; Janson, K.; Kalda, H. (2010). Power Losses in Induction Motors in Relation to Supply Voltage Quality. PCIM 2010 Power Electronics, Intelligent Motion, Power Quality, Nuremberg, Germany, 4-6 May 2010. VDE VERLAG GMBH, Berlin, Offenbach, 2010, 636 - 642.
7. Vinnal, T.; Janson, K.; Kalda, H. (2009). Analysis of Power Consumption and Losses in Relation to Supply Voltage Quality. *In: Proceedings of 13th European Conference on Power Electronics and Applications: 13th European Conference on Power Electronics and Applications EPE 2009, Barcelona, Spain, 8-10 September 2009.* IEEE, 2009 - 9 pp.

8. Vinnal, T.; Kütt, L.; Kalda, H. (2008). Analysis of Power Consumption and Losses in Relation to Supply Voltage Levels. *In: Proceedings of 2008 Power Quality and Supply Reliability Conference: 2008 Power Quality and Supply Reliability Conference, Pärnu, 27-29 August 2008*. IEEE, 2008, 23 - 28.
9. Janson, K.; Vinnal, T. (2008). Tuuleenergia tootmine võib osutada loodetust keerulisemaks. Äripäev, 30.07.2008.
10. Janson, K.; Bolgov, V.; Vinnal, T.; Järvik, J. (2007). New theoretical approach to input current shaping in ac-dc power converters. *In: Proceedings of 5th International Conference CPE 2007 Compatibility in Power Electronics: 5th International Conference CPE 2007 Compatibility in Power Electronics, Gdansk (Poland), May 29 - June 1, 2007. (Toim.) Gdynia Maritime University, IEEE*. Gdynia, Poland: IEEE, 2007.
11. Tint, P.; Kask, Ü.; Kõiv, T.-A.; Vinnal, T.; Reinhold, K. (2006). Improvement of environmental and health issues in educational institutions. *In: Safety and Reliability for Managing Risks: European Safety and Reliability Conference, Estoril, Portugal, 18-22 September 2006. (Toim.) Soares, G.; Zio, E.* Taylor & Francis Ltd, 2006, 835 - 840.

## KOKKUVÕTE

Energiatarbimise vähendamisel on oluline tegevussuund energiakasutuse tõhususe suurendamine ja sellega saavutatav energia kokkuhoid. Käesolev töö on pühendatud elektrienergia tõhusa ja säästliku kasutamise seotud probleemide uurimisele ettevõtetes ja sellekohase uurimismetoodika täiendamisele. Töö sisaldab ettevõtete ehk äritarbijate elektritarbimise ja toitepinge kvaliteedi uurimise tulemusi ning uurimise ja optimeerimise metoodika täiendusi. Antud probleemide ring hõlmab lähteinformatsiooni kogumist, elektritarbimise ning toitepinge kvaliteedi registreerivaid mõõtmisi ja tulemuste analüüsi. Uurimistulemuste alusel saab välja töötada soovitud elektrivarustuse optimeerimiseks ning võtta kasutusele abinõud nende soovitude realiseerimiseks.

Töö eesmärk on täiendada ettevõtete elektritarbimise uurimise metoodikat, mille alusel saab anda soovitusi elektritarbimise vähendamiseks. Samuti on eesmärgiks uurida toitepinge kvaliteeti Eesti ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides ning tuua välja seosed toitepinge kvaliteedi ja elektritarbimise vahel. Veel on eesmärgiks uurida reaktiivvõimsuse kompensatsiooni mõju elektritarbimisele ja toitepinge kvaliteedile ning koostada metoodika automaatse kondensaatorseadme võimsuse valikuks.

Töö koosneb kuuest peatükist. Esimeses peatükis on toodud ülevaade elektritarbimise olukorrast Eestis, tarbimise mahust, struktuurist ja elektrikasutamise tõhususest Eestis aastatel 1992...2010 ning muutustest selles valdkonnas. Peatüki lõpus on esitatud töös püstitatud probleemid ja eesmärgid.

Töö teises peatükis on kirjeldatud olemasolevat metoodikat ettevõtete elektritarbimise ja -varustuse uurimiseks ning analüüsitud toitepinge kvaliteedi alaseid seoseid elektritarbimisega ja toitepinge kvaliteeti mõjutavaid tegureid. Elektritarbimise uurimiseks ettevõtetes on kasutatud aktiiv- ja reaktiivvõimsuse koormusgraafikuid ning toitepinge kvaliteedi uurimiseks vastavaid arvulisi ja graafiliselt esitatud parameetreid.

Töö kolmandas peatükis on antud ülevaade põhilistest toitepinge kvaliteedi parameetritest ja neid reguleerivatest standarditest. Uuritavad toitepinge parameetrid on pingeniivo ja selle hajumine, kiired pingemuutused (pingelohud ja pingemuhud), pinge harmoonilised moonutused, värelus ehk flikker ja asümmeetria kolmefaasilises pingesüsteemis. Peatükis on esitatud toitepinge parameetrite mõõtetulemused, mis on saadud mõõtmistel erinevates ettevõtetes aastatel 2000...2010. Põhjalikumalt on välja toodud metoodika pingeniivo ehk pingetaseme ülevaatlikuks esitamiseks ja analüüsimiseks ning soovitude andmiseks toitepinge niivo valikul.

Ettevõtetes on väga oluline teadvustada seost 0,4 kV elektrisüsteemi pingeniivo ja elektritarbimise vahel ning määratleda antud elektrisüsteemile ning koormustele sobiv (optimaalne) pingeniivo. Pingeniivo uurimisel on peale arvuliste parameetrite soovitatav kasutada ülevaatlikke graafilisi esitusviise. Peatüki lõpus on välja toodud üldised hinnangud ja järeldused pingeniivo, pingehälvete, pinge harmooniliste moonutuste, väreluse ja asümmeetria kohta Eesti ettevõtete 0,4 kV elektri-

süsteemides. Pingeniivoo mõõtetulemused näitavad, et keskmine pinge on liiga kõrge ja ületab soovitatavat pingetaset 227...230 V vähemalt 5...6 V võrra, mis vastab toitetrafode astmelüliti ühele astmele 2,5%. Pingetaseme hajuvus sõltub oluliselt trafo võimsusest. Mida võimsam on trafo antud koormuse suhtes, seda väiksem on pingetaseme hajuvus. Heaks võib pidada hajuvust iseloomustavat pinge keskmist absoluuthälvet kuni 2,5 V, millele vastab pingetaseme muutumise vahemik ~15 V.

Registreeritud pingekvaliteedi parameetrid vastavad peaaegu kõigil juhtudel standardile EVS-EN 50160:2007. Seega ei võimalda ainult standardis sätestatud piirväärtustega võrdlemine otsustada, kas pinge on antud elektrisüsteemile sobiv (optimaalne) või mitte. Lisaks standardis toodud piirväärtustele on ettevõtte jaoks kasulik määratleda oma elektrisüsteemile sobiva või optimaalse pinge parameetrid.

Töö neljandas peatükis on antud ülevaade toitepinge kvaliteedi erinevate parameetrite mõjust elektritarbimisele, võimsuskadudele ja seadmetele. Põhjalikumalt on käsitletud toitepinge nivood ja toitepinge harmoonilisi moonutusi kui täiendavate võimsuskadude olulisemaid põhjustajaid 0,4 kV elektrisüsteemides. Peatükis on kirjeldatud kahte praktilist katsetoodikat elektrisüsteemide uurimiseks. Esimene neist on ette nähtud ettevõtte elektrisüsteemi aktiiv- ja reaktiivvõimsuse pingesõltuvuse uurimiseks ja koormuse staatilise mudeli parameetrite määramiseks. Teine katsetoodika on ette nähtud harmoonilistest põhjustatud lisakadude kaudseks määramiseks. Metoodikad võimaldavad hinnata ka seda, milline on kondensaatorseadme kasutamise mõju ettevõttele – kas see on kasulik või hoopis kahjulik. Ebasoodsas olukorras võib olla ka nii, et kondensaatorseadme kasutamisega väheneb küll reaktiivenergia tarbimine, kuid suureneb aktiivenergia tarbimine, samuti võivad suurened aktiivvõimsuskadod elektrisüsteemis ning võib suurened tõrgete oht ja väheneda elektriseadmete tööiga. Kokkuvõttes võib reaktiivvõimsuse kompensatsiooni ebasobiv tehniline lahendus tuua ettevõttele kasu asemel kahju. Kirjeldatud katsetoodikate peamisteks eelisteks on esmalt see, et katsete läbiviimine ei häiri kuidagi ettevõtte tööd – registreerivaid mõõtmisi on võimalik teha tavalises tööolukorras selleks toitekatkestusi tegemata, ning teiseks see, et saadud mõõtetulemustest juhuslike muutuste kõrvaldamiseks võib katseid teha korduvalt.

Töö viiendas peatükis on käsitletud reaktiivvõimsuse kompensatsiooni kondensaatorseadmetega ning selle eeliseid ja puudusi ettevõtete 0,4 kV elektrisüsteemides. On välja toodud põhilised seosed reaktiivvõimsuse ülekandmisest tingitud võimsuskadude arvutamiseks ning kondensaatorseadme süsteemi lülitamisel tekkiva pingemuutuse arvutamiseks. Samuti on esitatud uus metoodiline juhised automaatse kondensaatorseadme optimaalse võimsuse ning koosteosade valikuks, milles arvestatakse ka pinge ja voolu harmooniliste moonutustega.

Toitepinge keskmine väärtus, hajumine ja eriti selle miinimumväärtused sõltuvad oluliselt sellest, kas ettevõttes kasutatakse reaktiivvõimsuse kompensatsiooni. Kui kompensatsioon puudub, on pinge jaotuskõver tunduvalt suurema hajuvusega. Kompensatsiooni kasutamisega vähened pingeniivoo hajumine tavaliselt 2...3 korda ning tõuseb keskmine pinge. Pingeniivoo tõus on tavaliselt 2...3%, aga võib olla ka

kuni 5% sõltuvalt koormuse iseloomust, trafo lühispingest ja harmooniliste pingete tasemest süsteemis. Harmooniliste moonutuste tase nii voolus kui ka pinges tõuseb kondensaatorite lülitamisel süsteemi alati, kui ei kasutata filterreaktoreid. Voolu harmooniliste moonutuste  $THD_i$  tõus on tavaliselt 2...6 kordne ja pinge harmooniliste moonutuste  $THD_u$  tõus 1,2...2 kordne võrreldes lähteolukorraga. Töös on jõutud seisukohale, et kondensaatorseadmete kasutamisel tuleb tingimata arvestada pingeniivoo tõusu ning voolu ja pinge harmooniliste moonutuste suurenemise mõju tarbitavale võimsusele. Seda on võimalik teha kas analüütiliselt või – juhul, kui kondensaatorseadmed on juba paigaldatud – katseliselt mõõtmiste teel.

Kondensaatorseadmete kasutamisega seotud võimalikud negatiivsed kaasmõjud ei ole eriti tuntud. Nende mõjude hindamiseks on vaja teha elektrisüsteemi talitluse analüüs kas juba enne kondensaatorseadmete paigaldamist või olemasoleva seadme puhul kahes talitluses – ilma kondensaatorseadmeta ja sellega koos.

Töö kuues peatükk on pühendatud harmooniliste voolude ja pingete ning resonantside uurimisele 0,4 kV elektrisüsteemides, kus kasutatakse kondensaatorseadmeid või passiivfiltreid, ja vastava uurimismetoodika edasiarendamisele. On esitatud mõõtmiste ja katsete läbiviimise meetoodika harmooniliste voolude, pingete ja resonantside uurimiseks, samuti passiivfiltrite töö ja mõju uurimiseks. Harmooniliste voolude ja pingete arvessevõtmiseks arvutustes on välja töötatud lihtne 0,4 kV elektrisüsteemi arvutusmudel. Mudel võtab arvesse toitetrafo, koormuse ja kondensaatorseadme parameetrid. Harmoonilised voolud antakse ette igal harmoonilisel sagedusel eraldi, lähtudes tegelikest mõõtetulemustest. Mudel võimaldab arvutada voolud ja pinged süsteemis ning uurida resonantsitingimusi. Harmooniliste voolude ja pingete suurus süsteemis oleneb mittelineaarsete tarvitite võimsusest ning toiteahela ekvivalentsest näivtakistusest. Mudel võimaldab arvutada ka elektrisüsteemi näivtakistuse sageduskarakteristiku, mis on oluline juhul, kui süsteemis kasutatakse kondensaatoreid.

Töö kokkuvõtteks saab öelda, et oluline on uurida ettevõtete elektritarbimist ja elektrisüsteemide arendamise võimalusi komplekselt. Paljudel juhtudel on elektritarbimist võimalik tõhusamaks ja säästlikumaks muuta pingekvaliteedi parameetrite ning elektriseadmete sobiva valiku teel. Selleks on käesolevas töös esitatud uurimismetoodika täiendusi, mis võimaldavad ülevaatlikumalt ja täpsemalt hinnata elektritarbimise ja toitepinge kvaliteedi olukorda ning kondensaatorseadmete kasutamise mõju elektritarbimisele. Kondensaatorseadmete mõju võib olla ettevõttele nii kasulik kui ka kahjulik. Juhul, kui pinge ja voolu parameetrite muutustega ei arvestata, võib reaktiivvõimsuse kompensatsioon hoopis suurendada aktiivenergia tarbimist ja täiendavaid võimsuskadusid elektrisüsteemis ning kokkuvõttes suurendada ka ettevõtte kulutusi. Seepärast tuleb kondensaatorseadmete kasutamisel tingimata arvestada kompensatsiooni mõju pinge ja voolu parameetritele ning tarbitavale võimsusele.

## ABSTRACT

**KEYWORDS:** electric power consumption, optimization of power consumption, supply voltage quality, power losses, reactive power compensation, harmonics

To reduce power consumption and improve power utilization efficiency in companies it is important to carry on research in the field of supply voltage quality. This doctoral thesis is focused on the study of electric power consumption and optimization methods in industrial and commercial facilities, depending upon supply voltage quality parameters.

Supply voltage quality problems within the company power system are often discussed regarding disturbances and failures (voltage disturbances, harmonic resonances). Still, the supply voltage quality affects directly active and reactive power consumption and power losses in the consumer power system, particularly in induction motors, transformers and capacitors. The shunt capacitors used for reactive power factor correction affect directly the supply voltage level and harmonic distortions of supply voltage and current and hence affect power losses in industrial facilities, particularly in induction motors, transformers, lines and capacitors. Power losses are not so often in focus because losses in the consumer power systems are not measured directly.

In the thesis practical methods and measurement results are described for estimating power losses when power factor correction capacitors are used. The impact of capacitors upon supply voltage level and harmonic distortions is discussed. Measurement methods to establish relations between supply voltage level and power consumption and also between harmonic distortions and additional power losses are shown.

**Chapter 1** gives an overview about trends in electric power consumption in Estonia during the years 1992...2010 and points out some specific features regarding power quality and efficiency. As the amount of consumption per capita has been increasing steadily, losses in the network are about (10...12)% and the efficiency of using electric power is not as high as in neighbouring western countries around the Baltic Sea it is important to develop methods for measurements and analyses of power consumption and quality. Certain problems in the field of power quality have been pointed out, particularly the problem of voltage levels, harmonic distortions and losses, use of shunt capacitors in low voltage power systems and the benefits and drawbacks of this. The objectives of these thesis are to develop user-friendly methods for measurements, analyses and optimization of power consumption and power quality in companies.

**Chapter 2** presents the main relations and methods to study power consumption and supply voltage quality, the requirements of corresponding standards and the well-known methods of statistical processing of measurement data. The general requirements upon supply voltage quality have been stated in standard EVS-EN 50160:2007. The standard states that the supply voltage level has to remain in the



range of  $\pm 10\%$  of rated operating voltage. Also, the amount of total harmonic distortions  $THD_u$  should not exceed 8%. Operating the consumer power system close to these supply voltage limit values will be unfavorable for the customer causing extra power losses and consequently extra costs. In addition, heating of equipment and reduction of service time occurs. Therefore it is an important task to study the factors affecting the consumer power losses and consumption, on the one hand in order to accurately estimate power losses and on the other hand to enable a cost-benefit analyses of loss reduction measures.

**Chapter 3** discusses factors affecting supply voltage quality and basic voltage quality parameters in the 0,4 kV power systems of Estonian companies. Measurement results of basic voltage quality parameters are introduced. The measurements were carried out during the years 2000...2010 in Estonian companies, the total number of measurements is 66 and correspondingly the overall measurement time 66 weeks.

The power system of a company usually includes a substation with transformer and the metering point on the 10kV or 0,4kV side of the transformer. Voltage quality in the point of common coupling (PCC) is affected by the following factors.

- Customers' load characteristics (active and reactive loads, linear and nonlinear loads, load fluctuations, harmonic currents, load unbalance).
- Customers' power systems characteristics, presence of shunt capacitors, short-circuit power, voltage level in the MV network.
- Load characteristics of other consumers in the same network.
- Random effects like faults in the network or natural phenomena.

One of the most critical parameters for a consumer is the voltage level in PCC. This however is varying to some extent all the time. If the sum of impacts from different loads connected to the network is observed, it occurs that the supply voltage is always of random magnitude. The main problem of customers is often supposed to be too low voltage in the feeder. It is customary, that in industrial substations, the voltage on the transformer secondary side is stepped up in order to ensure the voltage level close to rated voltage during peak loads. This is also done to handle the voltage drops during the start of powerful induction motors. However this in turn means that most of the time the voltage level is higher than rated.

In this case the voltage levels do conform to the levels by the standard EN50160. The situation with voltage levels is quite specific for example in Estonia. As in some countries there is not enough power available during the peak load and therefore the supply voltage is stepped down slightly, in Estonia the utilities have had no need to limit power consumption. Consequently supply voltages are often higher than rated and the deviation from rated voltage is not symmetrical, but mostly above the rated value. Thus there is the problem with high voltage levels for the customers, as this situation brings along extra power losses, which will also contribute as extra costs for the customer.

**Chapter 4** discusses power consumption and power losses in companies affected by different parameters of voltage quality in consumers network. The factors affecting power consumption and power losses include the following.

- Voltage level in the customers LV power system, ( $U_{\text{mean}}$ );
- Load profile characteristics;
- Power factor (displacement power factor  $\cos\varphi$  and true power factor);
- Harmonic voltages and currents in the system;
- Asymmetry of voltages in a three-phase system.

Voltage level affects the amount of active and reactive power consumed, as well as losses in motors and transformers. The voltage variations are described as voltage deviations from rated voltage, expressed as a relative value:

$$\delta U = \frac{U - U_0}{U_0} \cdot 100\% ,$$

where:  $U_0$  – rated operating voltage;  
 $U$  – voltage actual value.

In order to specify the load relation upon the voltage level, different static load models are used. Generally, reactive power and active power behave in a different way. In a linear model factors expressing the equivalent load characteristics should be determined. Consequently, factors  $K_P$  and  $K_Q$  are used, expressing the load power consumption active and reactive parts respectfully:

$$K_P = \frac{\Delta P}{P_1} \cdot \frac{1}{\delta U} \quad \text{and} \quad K_Q = \frac{\Delta Q}{Q_1} \cdot \frac{1}{\delta U} ,$$

where:  $P_1$  – active power load at rated voltage;  
 $Q_1$  – reactive power load at rated voltage.

It is obvious that different consumers will have different load factors. Values proposed are in a wide range  $K_P = (0...2)$  and  $K_Q = (1,5...6)$  and have to be specified. The relation between power consumption and voltage level deviation will be expressed according to following expressions:

$$\begin{cases} P_{\text{tot}} = P_0 + K_P \delta U \cdot P_0 + \Delta P(\delta U) \\ Q_{\text{tot}} = Q_0 + K_Q \delta U \cdot Q_0 + \Delta Q(\delta U) \end{cases} .$$

For specifying the factors  $K_P$  and  $K_Q$  for different load types the following measurement method is introduced. According to the method active and reactive power is recorded simultaneously with supply voltage in every single second. At the time of the measurement, voltage level in the whole MV network is varied, using the on-load tap changer of the supplying 110/10kV transformer. From the measurement data stored the static load model characteristics of the consumer  $P=f(U)$  and  $Q=f(U)$  are calculated.

Furthermore, a new approach could be suggested based upon the load relation to voltage level and presented as voltage level statistical distribution. This is presented

as the distribution of measured voltage values and proposed optimum voltage values. Hence the supply voltage is characterized by the mean voltage value in one week period and the dispersion along the voltage scale.

The voltage level and the dispersion are primarily depending upon the 10/0,4 kV transformer power rating, the tap-changer position and the presence of shunt capacitors in the consumer power system. This is what the consumer can affect.

**Chapter 5** discusses problems of power factor correction with shunt capacitors. The application of controlled capacitor batteries has long been accepted as a suggested step for reactive power compensation and power factor correction. Still, using shunt capacitors has despite of several benefits also drawbacks, that affect not only the capacitors, but also power consumption and power losses in the whole system. The advantages of reactive power compensation are well known and could be listed as follows.

- Improved power factor and reduced reactive energy consumption leading to lower costs. Utilities in Estonia require that the consumers improve the power factor of their installations. This is in the form of reactive power tariffs, which are imposed on larger customers when their power factor falls below 0,98.
- Reduced current (the lagging component) of the circuit and reduced power system losses. The ohmic losses in industrial power systems vary from 2,5% to 7,5% of the load. This depends on the peak-load hours and cross-section of cables. These losses are inversely proportional to the square of power factor.
- Released capacity of transformers and supply lines. When capacitor banks are in operation, they furnish magnetizing current for motors and transformers, thus reducing the current demand from the power plant. This means capacitors can be used to permit additional load to be added to existing facilities.
- Improved voltage profile. Consumer power systems with inductive loads experience large voltage variations, as variations in reactive power have more impact upon voltage level as compared to active power variations. The reason is in the fact, that the system impedance is mainly inductive. Capacitors help to reduce voltage variations, even in case of short duration motor starts.

In addition to benefits, the drawbacks of reactive power compensation have to be considered as well. These are not so well-known and could be listed as follows.

- Increased voltage level, particularly in case the voltage level is equal to rated voltage without capacitors. When switching on capacitors the supply voltage level will increase depending upon the capacitor power rating and the supply transformer impedance. Increased voltage level will cause increased power consumption in the loads, particularly in motors and transformers.
- Increased harmonic distortions both in the supply current and supply voltage. Higher harmonic distortions will cause higher power losses. In the worst case harmonic resonance could occur.

- Power losses in the capacitor equipment when capacitors are switched on. Though relatively small, these losses are not negligible, particularly in case of high harmonic distortions.
- Capacitor switching transients. These transients in voltage and current occur when capacitors are energized and measures are taken to limit these transients, e.g. special resistor contactors or additional inductors in the capacitor circuit.

**Chapter 6** introduces analyses of harmonic currents and voltages in industrial LV power systems and measurement results of resonance conditions in three different cases. A measurement method to establish harmonic losses and a simulation model of LV system to calculate currents and voltages in the presence of harmonic currents is introduced. Harmonic distortions of supply voltage affect both power losses in the consumer power system and lifetime of equipment.

The rate of harmonic distortions of industrial and commercial LV networks in Estonia has been increasing from the middle of the 90-ies caused by intensive installation of adjustable speed drives, welding rectifiers, converters, electronic luminaries and other nonlinear equipment. In case of significant harmonic distortions of supply voltage harmonic losses have to be estimated. Measurement results of voltage harmonic distortions in industrial networks indicate, that often the limit value 8% for  $THD_u$  has been reached and the total harmonic distortion in supply current  $THD_i$  is 20...40%.

Application of distorted voltage to a motor results in additional ohmic losses in the windings and losses in the magnetic core of the motor. In addition, power losses in motors are caused by negative sequence harmonics (5-th, 11-th, 17-th etc) which cause magnetic fields that revolve in a direction opposite to that of the fundamental field. So the harmonic losses in motors appear:

$$\Delta P_h = \Delta P_{ohmic,h} + \Delta P_{core,h} + \Delta P_{torque,h} \cdot$$

The harmonic losses in motors are not negligible. Still there is the problem, how to measure or calculate power losses in a meshed industrial network? The equation for practical calculations of harmonic losses could be presented like:

$$\Delta P_h = K \cdot P_{tot} \cdot \sum_{h=2}^{\infty} \frac{1}{h} \left( \frac{U_h}{U_1} \right)^2 \cdot$$

A real industrial factory comprises hundreds of motors, lots of transformers, converters and other electrical equipment. Therefore calculation or measurement of losses be pieces of electrical equipment would be unrealistic.

In this thesis a method for measuring harmonic losses in industrial consumers is described and the measurement results are presented. The goal of the measurement was to determine the relation between harmonic losses and harmonic distortions of supply voltage when switching on and off the capacitor battery and thus changing the rate of harmonic distortions in the system. The measurement has been carried out in the PCC of an industrial plant recording simultaneously the following parameters:

active power, supply voltage, active power losses in the capacitor equipment and harmonic distortions of supply voltage. When capacitors without filtering reactors are switched on, total harmonic distortions in the supply current and in the supply voltage will increase. Assuming that the mechanical load of the system is constant the total active power variations  $\Delta P_{tot}$  depend upon voltage level variation, capacitor battery losses and harmonic losses in the system:

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_{\Delta U} + \Delta P_C + \Delta P_h ,$$

where:

$\Delta P_{\Delta U}$  – active power losses due to higher voltage level;

$\Delta P_C$  – active power losses in capacitor equipment;

$\Delta P_h$  – harmonic losses in the system due to higher  $THD_u$  and  $THD_i$ .

The performed measurements show, that when increasing the total harmonic distortions  $THD_u$  value from 4,8% to 6,9% and assuming that the specific voltage related load factor  $K_p$  is equal to 1, the harmonic losses  $\Delta P_h$  will increase by 3,8% from the total power demand  $P_{tot}$ . This indicates, that the harmonic losses in LV power systems could be remarkable.

## Conclusions

- The supply voltage quality parameters affect power consumption and power losses in industrial and commercial power systems and is often not in focus because the losses are not estimated.
- The supply voltage level is one of the basic factors affecting power consumption and losses in motors and transformers. A practical measurement method to determine load factors of consumers is introduced.
- Harmonic distortions of supply voltage have been increasing in Estonia. Distortion factors like  $THD_u$  over 8% and  $THD_i$  over 40% are not exceptions. Harmonic losses can be remarkably high in some LV systems and need to be estimated to make further improvements in efficiency of the system.
- When power factor correction capacitors are used, the benefits and drawbacks of reactive power compensation have to be considered thoroughly. Otherwise the drawbacks could lead to higher costs for the company because of higher voltage level, higher harmonic losses and reduced lifetime of equipment.
- A practical measurement method for estimating harmonic losses is introduced. The measurement results show that harmonic losses in industrial LV power systems are remarkable and could be around 3...4% from total power consumed.
- In this thesis power consumption and optimization measurement and analyses methods are introduced. Such methods would be the bases for selecting optimum power quality parameters and measures for improving efficiency in LV power systems.

**ELULOOKIRJELDUS****Üldandmed****Isikuandmed**

Ees- ja perekonnanimi Toomas Vinnal  
 Sünniaeg ja koht 19. august 1959, Tallinn  
 Kodakondsus Eesti  
 Perekonnaseis Abielus, abikaasa Ann Vinnal, 3 täiskasvanud last

**Kontaktandmed**

Address Retke tee 22-13, 13415 Tallinn  
 Telefon 55 44 336  
 E-posti aadress [toomasvinnal@hotmail.ee](mailto:toomasvinnal@hotmail.ee)

**Hariduskäik**

Õppeasutus (nimetus lõpetamise ajal)	Lõpetamise aeg	Haridus (eriala/kraad)
Tallinna Tehnikaülikool	1992	Tehnikamagister
Tallinna Tehnikaülikool	1982	Mehaanikainsener
Tallinna 7. Keskkool	1977	

**Keelteoskus**

Keel	Tase
Eesti keel	Emakeel
Inglise keel	Kõrgtase
Vene keel	Keskase
Rootsi keel	Algtase

**Täiendõpe**

Valdkond	Korraldaja	Toimumise aeg
Doktorant (REV)	TTÜ energeetikateaduskond, energia ja geotehnika eriala	1.09.2007 – 30.08.2011
Elektri kvaliteet	Budapesti Tehnikaülikool	3.10.2001 – 20.10.2001
Elektri kvaliteet	Taani Elektriettevõtete Instituut (DEFU), Elektriuringute Instituut (SINTEF) Norras	1.10.1998 – 30.10.1998
Mõõtetehnika ja energiasääst	Rootsi Kuninglik Tehnikaülikool KTH/TTÜ, ettevõtte ETM Mätteknik AB Stockholmis	1.02.1993 – 30.04.1993

## Teenistuskäik

Töötamise aeg	Ülikooli, teadusasutuse või muu organisatsiooni nimetus	Ametikoht
2003...2011	OÜ EVAR (TTÜ spin-off ettevõtte)	Insener
1990...2003	TTÜ elektrotehnika aluste ja elektrimasinate instituut	Teadur
1987...1989	TTÜ Elektrotehnika aluste ja elektrimasinate kateeder	Aspirant
1982...1986	TA KBFI (Keemilise ja bioloogilise füüsika instituut)	Insener ja vaneminsener

## Teadustegevus

Teadustegevus on toimunud Elektrotehnika aluste ja elektrimasinate instituudi teadustöö põhisuundades teostatud vastavate teemade ning rakendusprojektide raames töö täitjana ning doktoritöö koostamisel teostatud uuringute vormis. Teadustegevuse viimase 5 aasta olulisemad tulemused on esitatud järgmistes publikatsioonides.

1. Vinnal, T.; Kalda, H.; Mölder, H. (2011). Measurements and analyses of supply voltage magnitude and voltage variations. *In: 10th International Symposium "Topical problems in the field of electrical and power engineering. Doctoral school of energy and geotechnology". II : Pärnu, Estonia, January 10-15, 2011: (Toim.) Rain Lahtmets.* Tallinn: Estonian Society of Moritz Hermann Jacobi, 2011, lk 46...51.
2. Vinnal, T.; Janson, K.; Kalda, H.; Kütt, L. (2010). Analyses of Supply Voltage Quality, Power Consumption and Losses Affected by Shunt Capacitors for Power Factor Correction. *In: PQ2010: 7th International Conference 2010 Electric Power Quality and Supply Reliability, Conference Proceedings, Kuressaare, Estonia, June 16-18, 2010. (Toim.) Sakkos, Tiiu.* IEEE, 2010.
3. Mölder, H.; Vinnal, T.; Beldjajev, V. (2010). Harmonic losses in induction motors caused by voltage waveform distortions. *In: PQ2010: 7th International Conference 2010 Electric Power Quality and Supply Reliability, Conference Proceedings, Kuressaare, Estonia, June 16-18, 2010.* IEEE, 2010.
4. Mölder, H.; Vinnal, T.; Beldjajev, V. (2010). Analysis on AC Motor Losses due to Harmonic Levels Increase Caused by Switched Capacitor Passive Power Factor Correction. 9th International Symposium Pärnu 2010 "Topical Problems In The Field Of Electrical And Power Engineering", Pärnu, Estonia, June 14 - 19, 2010, lk 42...46.
5. Vinnal, T.; Kalda, H.; Mölder, H. (2010). Harmonic Voltage and Currents in LV Industrial Power Systems, Shunt Capacitors and Additional Power Losses. *In: 9th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering", Pärnu, Estonia, June 14 - 19, 2010: (Toim.) Lahtmets, R.,* 2010, lk 47...52.
6. Vinnal, T.; Janson, K.; Kalda, H. (2010). Power Losses in Induction Motors in Relation to Supply Voltage Quality. PCIM 2010 Power Electronics, Intelligent

Motion, Power Quality, Nuremberg, Germany, 4-6 May 2010. VDE VERLAG GMBH, Berlin, Offenbach, 2010, lk 636 - 642.

7. Vinnal, T.; Janson, K.; Kalda, H. (2009). Analysis of Power Consumption and Losses in Relation to Supply Voltage Quality. *In: Proceedings of 13th European Conference on Power Electronics and Applications EPE 2009, Barcelona, Spain, 8-10 September 2009*. IEEE, 2009 - 9 lk.
8. Vinnal, T.; Kütt, L.; Kalda, H. (2008). Analysis of Power Consumption and Losses in Relation to Supply Voltage Levels. *In: Proceedings of 2008 Power Quality and Supply Reliability Conference: 2008 Power Quality and Supply Reliability Conference, Pärnu, 27-29 August 2008*. IEEE, 2008, lk 23...28.
9. Janson, K.; Vinnal, T. (2008). Tuuleenergia tootmine võib osutada loodetust keerulisemaks. Äripäev 30.07.2008.
10. Janson, K.; Bolgov, V.; Vinnal, T.; Järvik, J. (2007). New theoretical approach to input current shaping in ac-dc power converters. *In: Proceedings of 5th International Conference CPE 2007, Gdansk (Poland), May 29 - June 1, 2007. (Toim.) Gdynia Maritime University, IEEE*. Gdynia, Poland: IEEE, 2007.
11. Tint, P.; Kask, Ü.; Kõiv, T-A.; Vinnal, T.; Reinhold, K. (2006). Improvement of environmental and health issues in educational institutions. *In: Safety and Reliability for Managing Risks: European Safety and Reliability Conference, Estoril, Portugal, 18-22 September 2006. (Toim.) Soares, G.; Zio, E.. Taylor & Francis Ltd, 2006*, lk 835...840.

### **Kaitstud lõputööd**

Magistritöö elektriseadmete erialal teemal Trafo väljavõtete ümberlüüti, 1992

Diplomiprojekt peenmehaanikaseadmete erialal, mehaanikainsener, 1982

### **Teadustöö põhisuunad**

Loodusteadused ja tehnika, Elektrotehnika ja elektroonika, 4.8. Energeetikaalased uuringud, Ettevõtete elektritarbimise ja elektrikvaliteedi uurimine ja optimeerimine, 4.17.

### **Teised uurimisprojektid**

Olen osalenud täitjana uurimistöodes ja projektides kahes valdkonnas.

- Reguleeritava võimsusteguriga koormusega isekohastuvate resonants-muundurite uurimine.
- Ettevõtete elektrisüsteemide, elektrikvaliteedi ja elektritarbimise optimeerimise rakendusprojektides ning ekspertiisides, milliseid viimase 12 aasta jooksul on olnud ca 70.



**CURRICULUM VITAE****General data****Personal data**

Name Toomas Vinnal  
 Date and place of birth 19. august 1959, Tallinn  
 Citizen Estonia  
 Family Married to Ann Vinnal, 3 grown up children

**Contact information**

Address Retke tee 22-13 Tallinn 13415 Estonia  
 Phone 55 44 336  
 E-mail [toomasvinnal@hot.ee](mailto:toomasvinnal@hot.ee)

**Education**

Educational Institution	Graduation year	Education (field of study/degree)
Tallinn University of Technology	1992	Electric Power Engineering, M.Sc.
Tallinn University of Technology	1982	Mechanical Engineering, Dipl. Eng.
Secondary School No 7 Tallinn	1977	

**Language competence/skills**

Language	Level
Estonian	fluent
English	fluent
Russian	average
Swedish	basic

**Special Courses**

Field	Organisations	Period
Doctoral student	Tallinn University of Technology, Faculty of Power Engineering	1.09.2007 – 30.08.2011
Electric power quality	Budapest University of Technology	3.10.2001 – 20.10.2001
Electric power quality	Danish Institute of Electric Companies (DEFU), Norwegian Institute of Electrical Engineering (SINTEF), Norway	1.10.1998 – 30.10.1998

Measurements and power economy	Swedish University of Technology KTH, company ETM Mätteknik AB, Stockholm	1.02.1993 – 30.04.1993
--------------------------------	---	------------------------

### Professional Employment

Period	Organisation	Position
2003...2011	OÜ EVAR (spinn-off company of TUT)	engineer
1990...2003	Tallinn University of Technology, Faculty of Power Engineering	researcher
1987...1989	Tallinn University of Technology	post-graduate student
1982...1986	Institute of chemical and biological physics	engineer and sen. engineer

### Scientific work

The results of scientific work during the last 5 years are published in the following papers:

1. Vinnal, T.; Kalda, H.; Mölder, H. (2011). Measurements and analyses of supply voltage magnitude and voltage variations. *In: 10th International Symposium "Topical problems in the field of electrical and power engineering. Doctoral school of energy and geotechnology". II : Pärnu, Estonia, January 10-15, 2011: (Toim.) Rain Lahtmets.* Tallinn: Estonian Society of Moritz Hermann Jacobi, 2011, pp. 46...51.
2. Vinnal, T.; Janson, K.; Kalda, H.; Kütt, L. (2010). Analyses of Supply Voltage Quality, Power Consumption and Losses Affected by Shunt Capacitors for Power Factor Correction. *In: PQ2010: 7th International Conference 2010 Electric Power Quality and Supply Reliability, Conference Proceedings: 7th International Conference 2010 Electric Power Quality and Supply Reliability, Kuressaare, Estonia, June 16-18, 2010. (Toim.) Sakkos, Tiiu.* IEEE, 2010.
3. Mölder, H.; Vinnal, T.; Beldjajev, V. (2010). Harmonic losses in induction motors caused by voltage waveform distortions. *In: PQ2010: 7th International Conference 2010 Electric Power Quality and Supply Reliability, Conference Proceedings: 7th International Conference 2010 Electric Power Quality and Supply Reliability, Kuressaare, Estonia, June 16-18, 2010.* IEEE, 2010.
4. Mölder, H.; Vinnal, T.; Beldjajev, V. (2010). Analysis on AC Motor Losses due to Harmonic Levels Increase Caused by Switched Capacitor Passive Power Factor Correction. 9th International Symposium Pärnu 2010 "Topical Problems In The Field Of Electrical And Power Engineering" and "Doctoral School of Energy and Geotechnology II", Pärnu, Estonia, June 14 - 19, 2010, pp. 42...46. Tallinn University of Technology.
5. Vinnal, T.; Kalda, H.; Mölder, H. (2010). Harmonic Voltage and Currents in LV Industrial Power Systems, Shunt Capacitors and Additional Power Losses. *In: 9th International Symposium Pärnu 2010 "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering" and "Doctoral School of Energy and Geotechnology II", Pärnu, Estonia, June 14 - 19, 2010: (Toim.) Lahtmets, R., 2010, 47...52.*

6. Vinnal, T.; Janson, K.; Kalda, H. (2010). Power Losses in Induction Motors in Relation to Supply Voltage Quality. PCIM 2010 Power Electronics, Intelligent Motion, Power Quality, Nuremberg, Germany, 4-6 May 2010. VDE VERLAG GMBH, Berlin, Offenbach, 2010, pp. 636...642.
7. Vinnal, T.; Janson, K.; Kalda, H. (2009). Analysis of Power Consumption and Losses in Relation to Supply Voltage Quality. In: *Proceedings of 13th European Conference on Power Electronics and Applications: 13th European Conference on Power Electronics and Applications EPE 2009, Barcelona, Spain, 8-10 September 2009*, 9 pp.
8. Vinnal, T.; Kütt, L.; Kalda, H. (2008). Analysis of Power Consumption and Losses in Relation to Supply Voltage Levels. In: *Proceedings of 2008 Power Quality and Supply Reliability Conference: 2008 Power Quality and Supply Reliability Conference, Pärnu, 27-29 August 2008*. IEEE, 2008, pp. 23...28.
9. Janson, K.; Vinnal, T. (2008). Tuuleenergia tootmine võib osutada loodetust keerulisemaks. Äripäev 30.07.2008.
10. Janson, K.; Bolgov, V.; Vinnal, T.; Järvik, J. (2007). New theoretical approach to input current shaping in ac-dc power converters. In: *Proceedings of 5th International Conference CPE 2007 Compatibility in Power Electronics: 5th International Conference CPE 2007 Compatibility in Power Electronics, Gdansk (Poland), May 29 - June 1, 2007. (Toim.) Gdynia Maritime University, IEEE. Gdynia, Poland: IEEE, 2007.*
11. Tint, P.; Kask, Ü.; Kõiv, T.-A.; Vinnal, T.; Reinhold, K. (2006). Improvement of environmental and health issues in educational institutions. In: *Safety and Reliability for Managing Risks: European Safety and Reliability Conference, Estoril, Portugal, 18-22 September 2006. (Toim.) Soares, G.; Zio, E.. Taylor & Francis Ltd, 2006, pp. 835...840.*

### **Defended theses**

Master thesis in electrical equipment (Transformer on-load tap-changer), MsC, Tallinn University of Technology, 1992.

Diploma project in fine mechanics, Civil engineer in mechanics, Tallinn University of Technology, 1982.

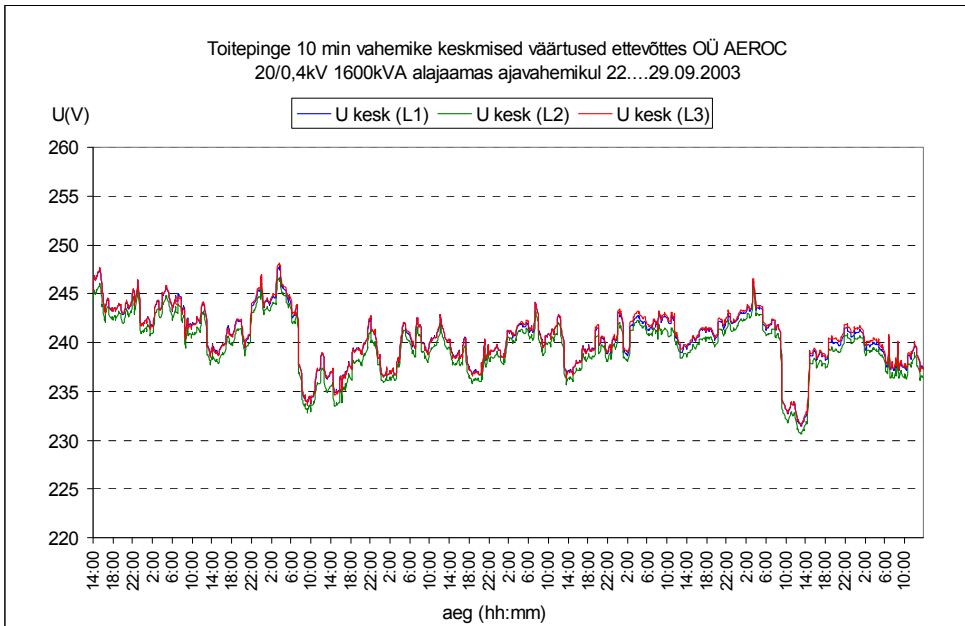
### **Main areas of scientific work / Current research topics**

Natural Sciences and Engineering, Electrical Engineering and Electronics, 4.8. (Electric power quality and economy, Electromagnetic compatibility, Optimization of electric power consumption). Natural Sciences and Engineering, 4.17. Energetic Research (Analyses and optimization of electric power consumption).

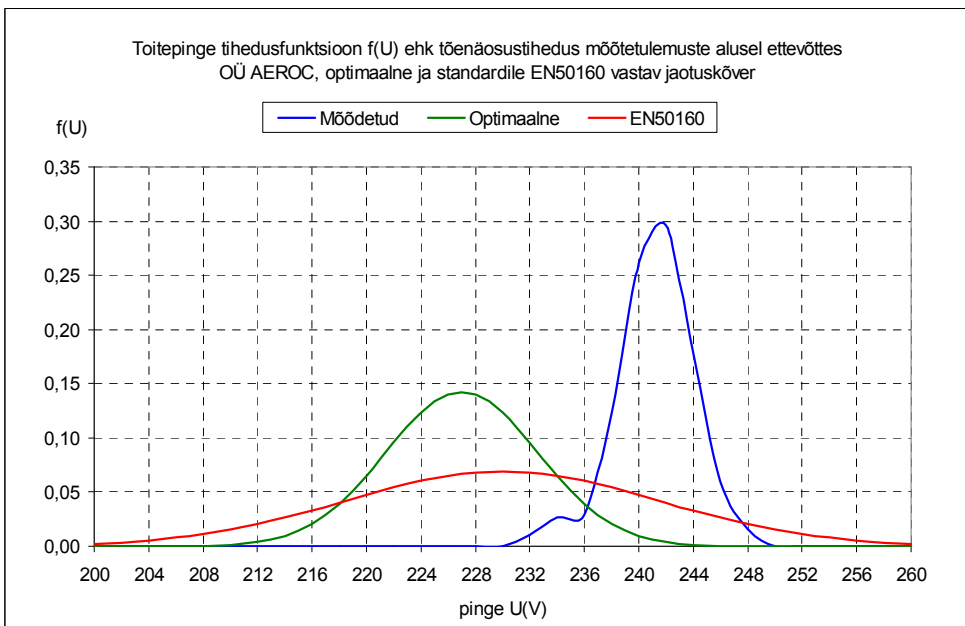
### **Other research projects**

Carried out studies about power consumption and optimization in industrial companies and buildings

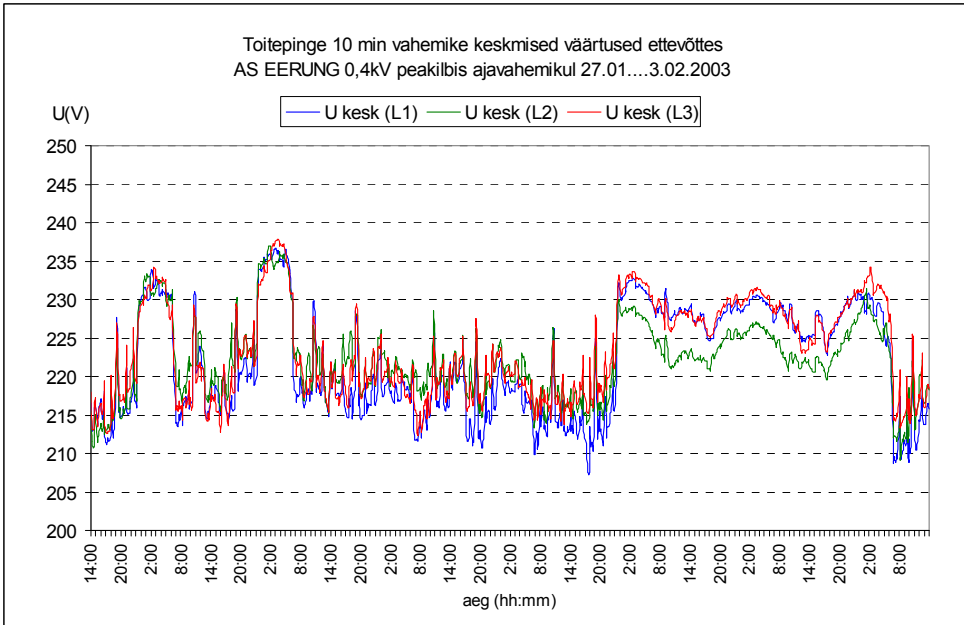
## Näiteid toitepinge parameetrite mõõtetulemustest



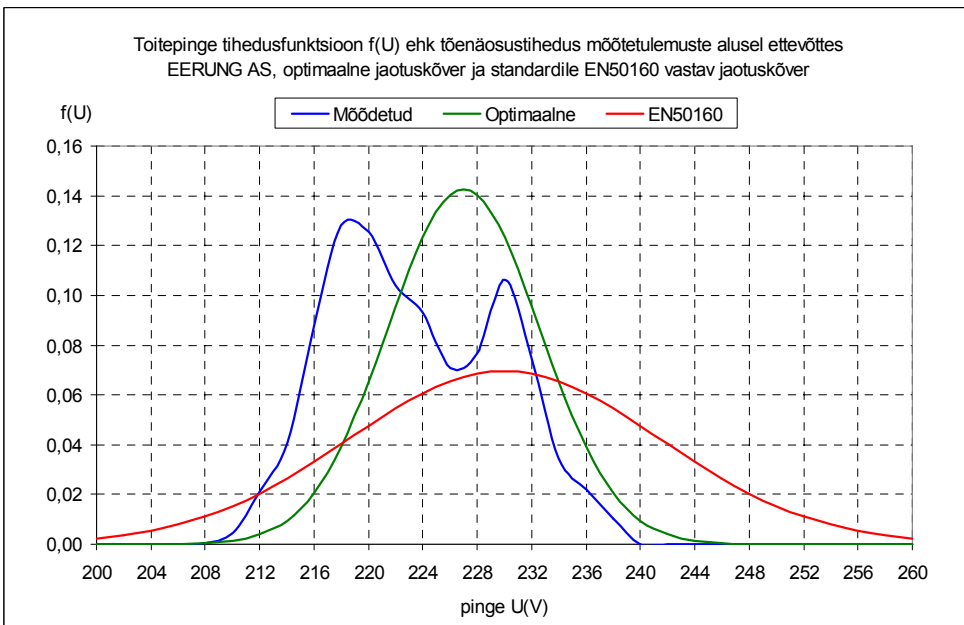
Joonis 1. Toitepinged kolmes faasis ühe nädala vältel ettevõttes OÜ AEROC



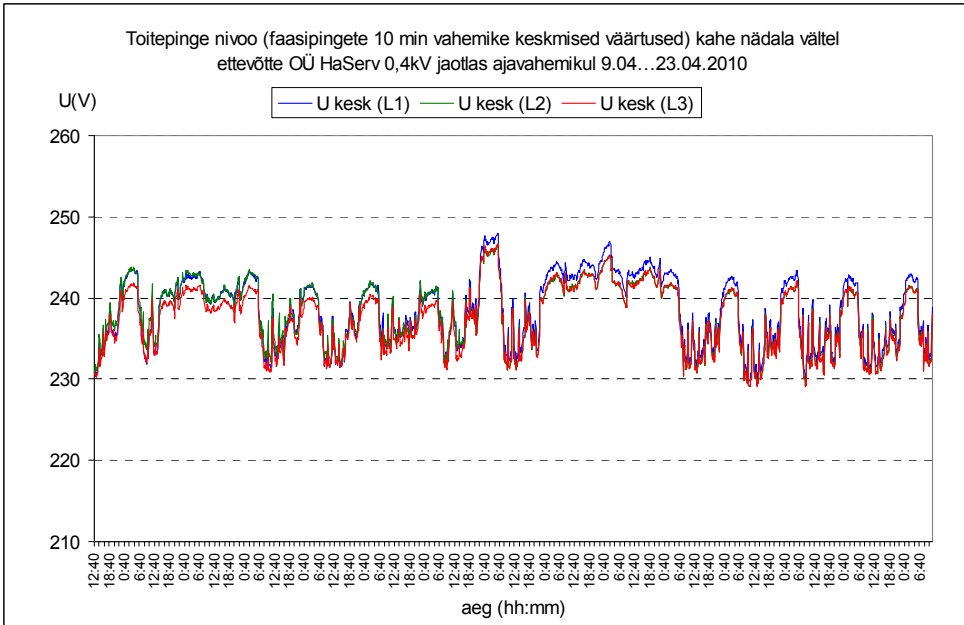
Joonis 2. Toitepinge tõenäosustiheduse jaotuskõver mõõtetulemuste alusel, standardile vastav ja optimaalne jaotuskõver, tegelik pingeniivoo on kõrge, trafoaste ebasobiv



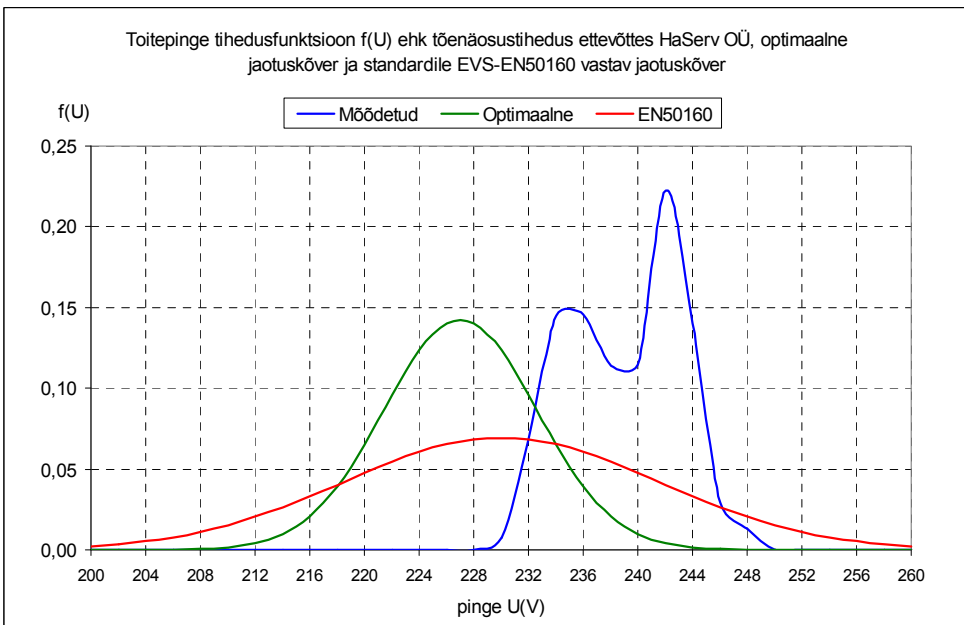
Joonis 3. Toitepinged kolmes faasis ühe nädala vältel ettevõttes AS EERUNG, reaktiivvõimsuse kompensatsioon puudub, pingeniivo on madal



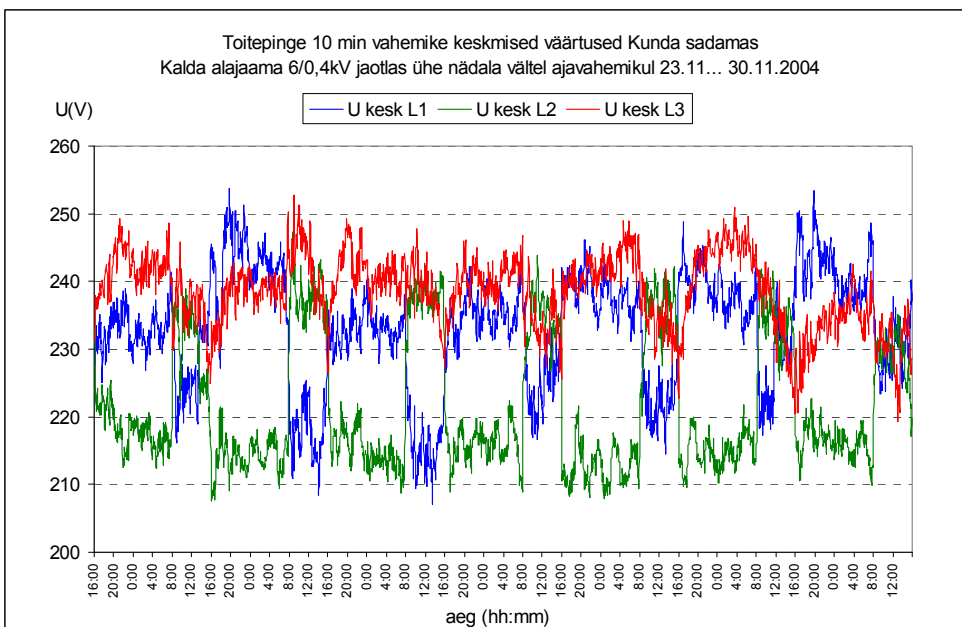
Joonis 4. Toitepinge tõenäosustihedus ettevõttes AS EERUNG, standardile vastav jaotuskõver ja optimaalne jaotuskõver, reaktiivvõimsuse kompensatsiooni puudumise tõttu on pingeniivo hajuvus suur ja pinge madal



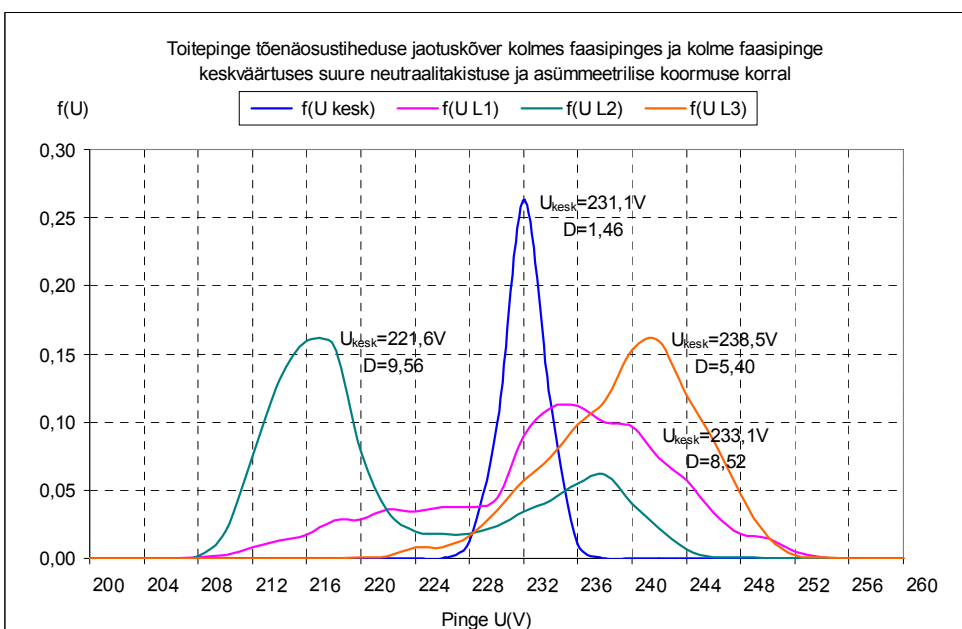
Joonis 5. Toitepinged kolmes faasis kahe nädala vältel puidutööstuse ettevõttes OÜ HaServ, reaktiivvõimsuse kompensatsioon puudub, trafoaste liiga kõrge



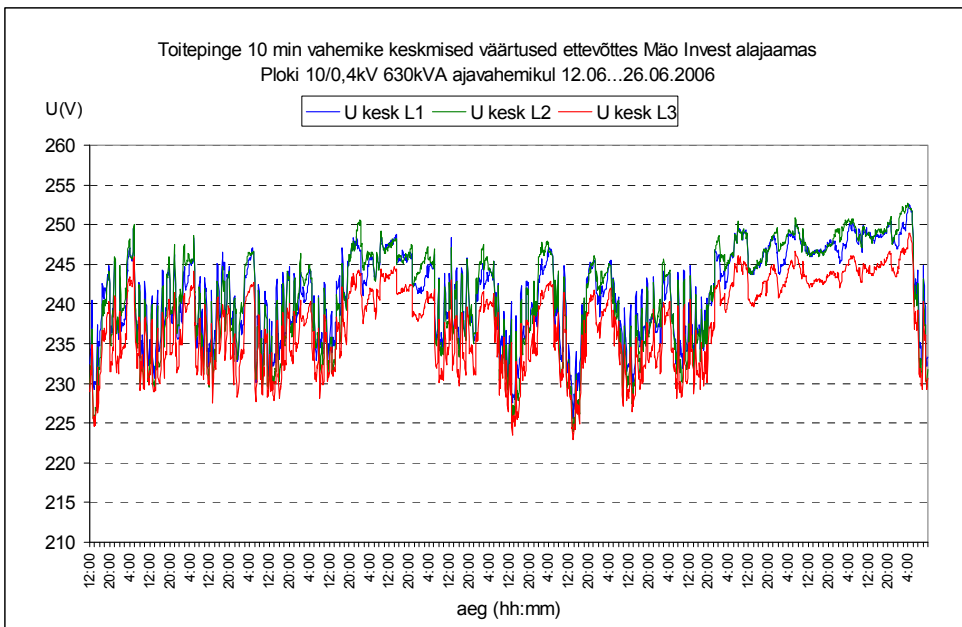
Joonis 6. Toitepinge tõenäosustiheduse jaotuskõver ettevõttes HaServ OÜ, optimaalne jaotuskõver ja standardile vastav jaotuskõver



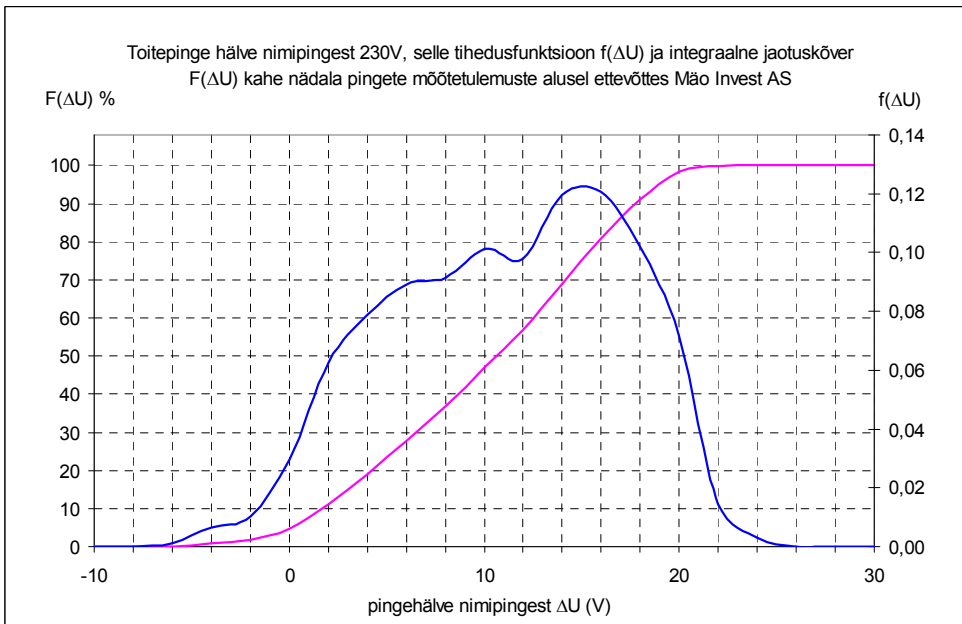
Joonis 7. Toitepinge 5 min keskvaartused Kunda sadama välisvalgustuses Kalda alajaama 6/0,4 kV jaotlas ühe nädala vältel



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

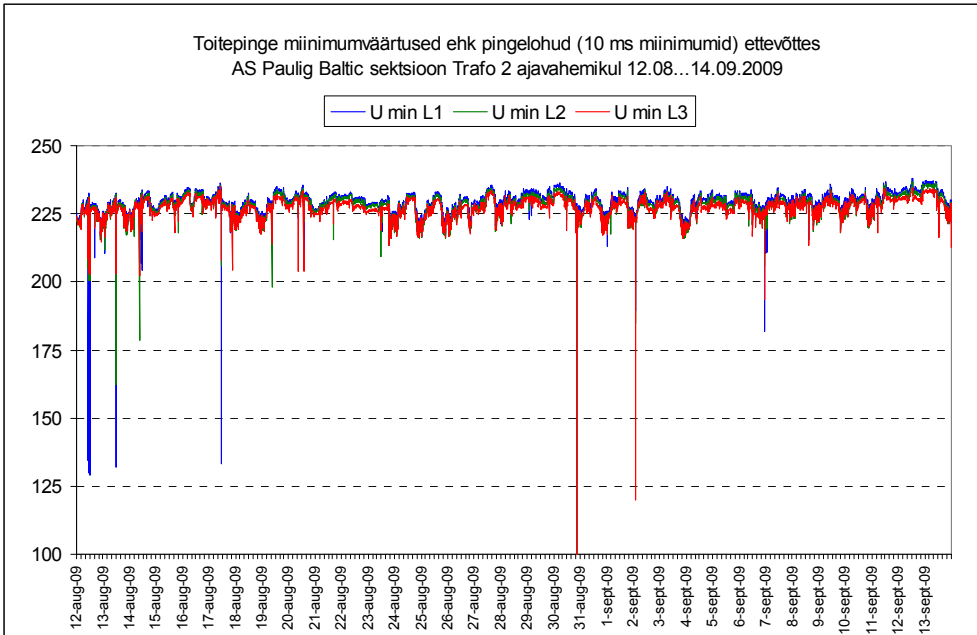


Joonis 9. Toitepinged kolmes faasis kahe nädala vältel ettevõttes AS Mäo Invest, alajaam Ploki 10/0,4 kV 630 kVA, reaktiivvoimsuse kompensatsioon puudub, trafoaste kõrge

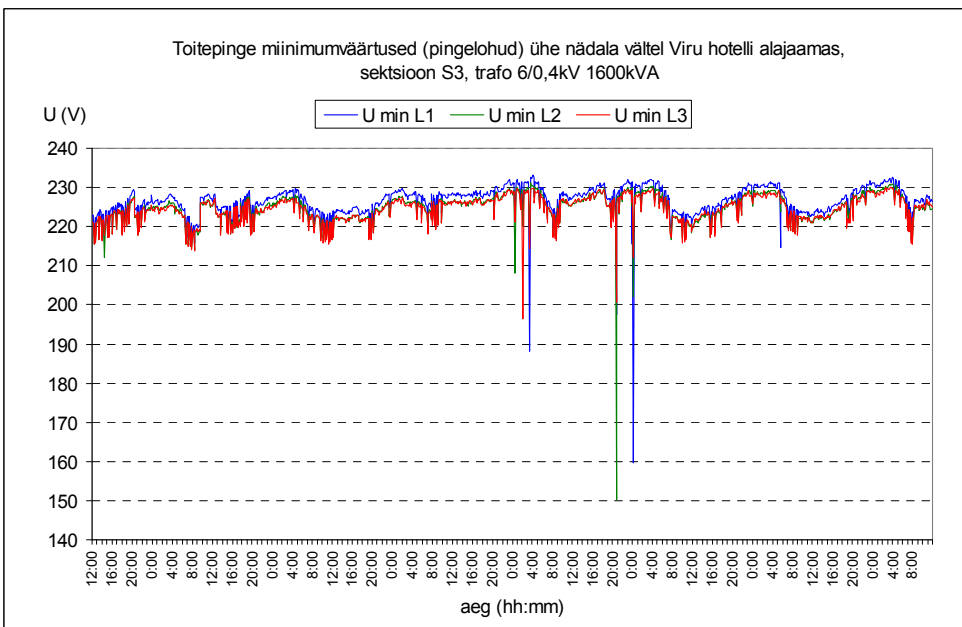


Joonis 10. Toitepinge hälve nimipingest, selle tihedusfunktsioon  $f(\Delta U)$  ja integraalne jaotuskõver  $F(\Delta U)$  iseloomustavad pingehälbe jaotust nimipinges suhtes

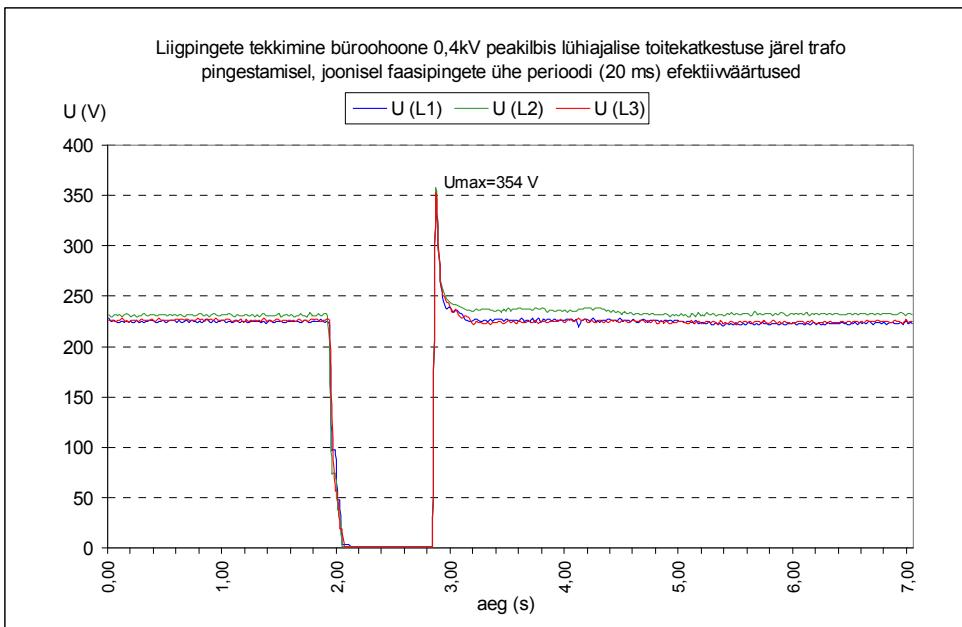




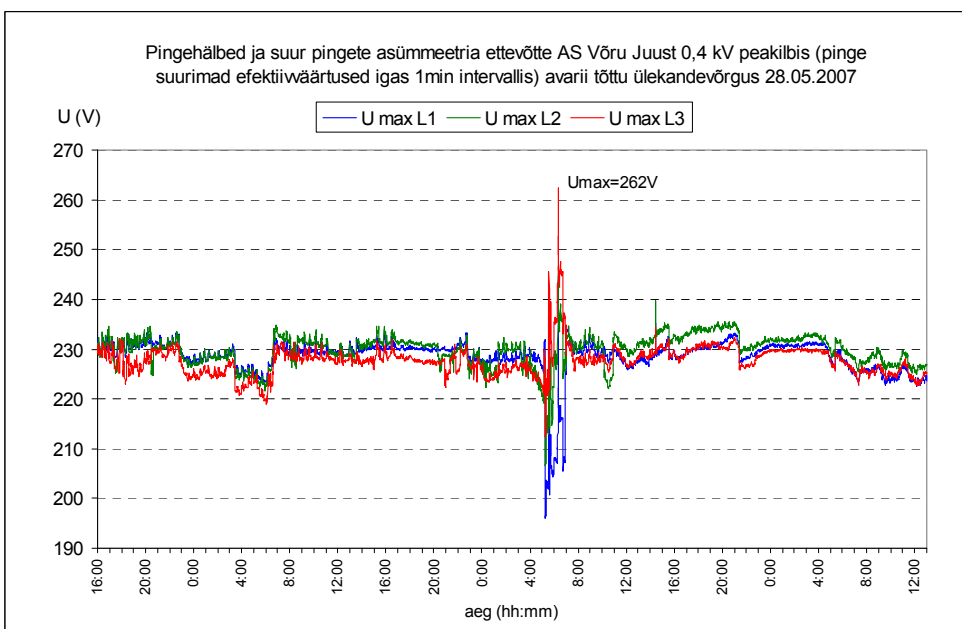
Joonis 11. Toitepinge miinimumväärtused ühe kuu vältel ettevõttes AS Paulig Baltic, pingelohud on tingitud ülekande ja jaotusvõrgu lühistest



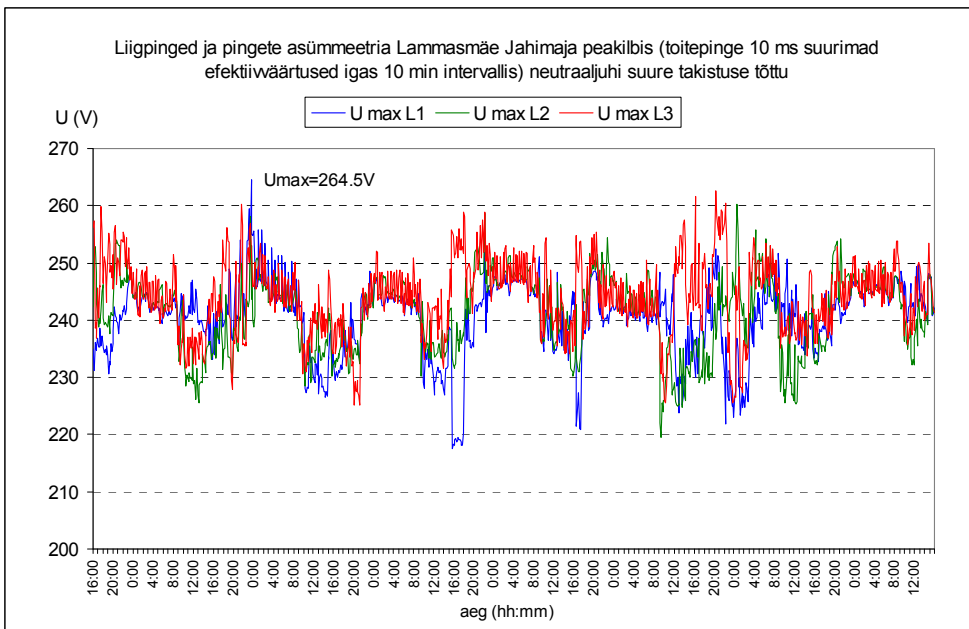
Joonis 12. Toitepinge miinimumväärtused ühe nädala vältel Viru hotelli alajaamas, trafo 6/0,4 kV 1600 kVA, pingelohud põhjustatud lühistest ülekande- ja jaotusvõrgus



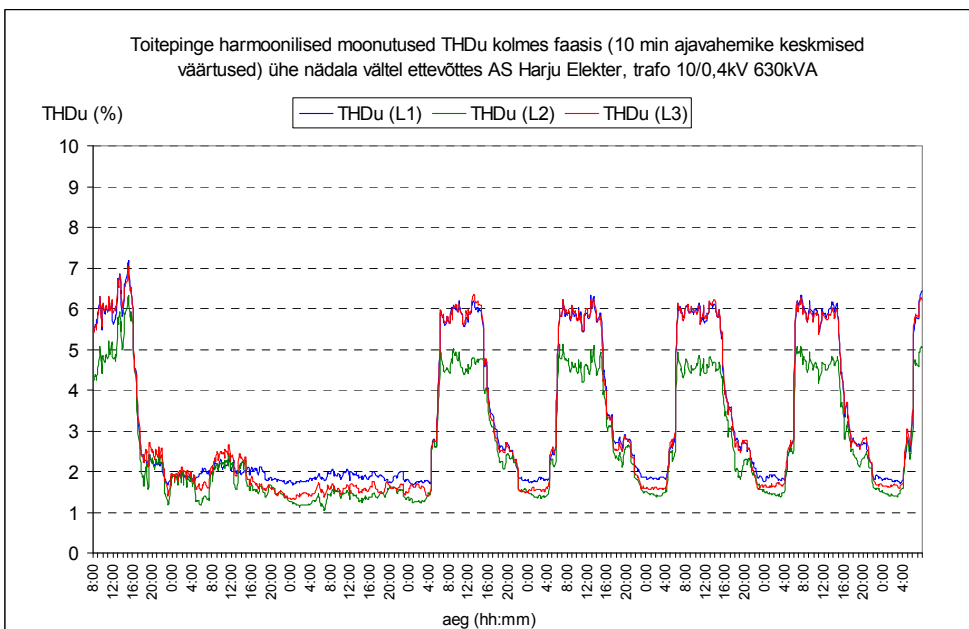
Joonis 13. Liigpinged büroohoone 0,4 kV peakilbis lühiajalise toitekatkestuse järel trafo taaspingestamisel, joonisel faasipingete ühe perioodi efektiivväärtused



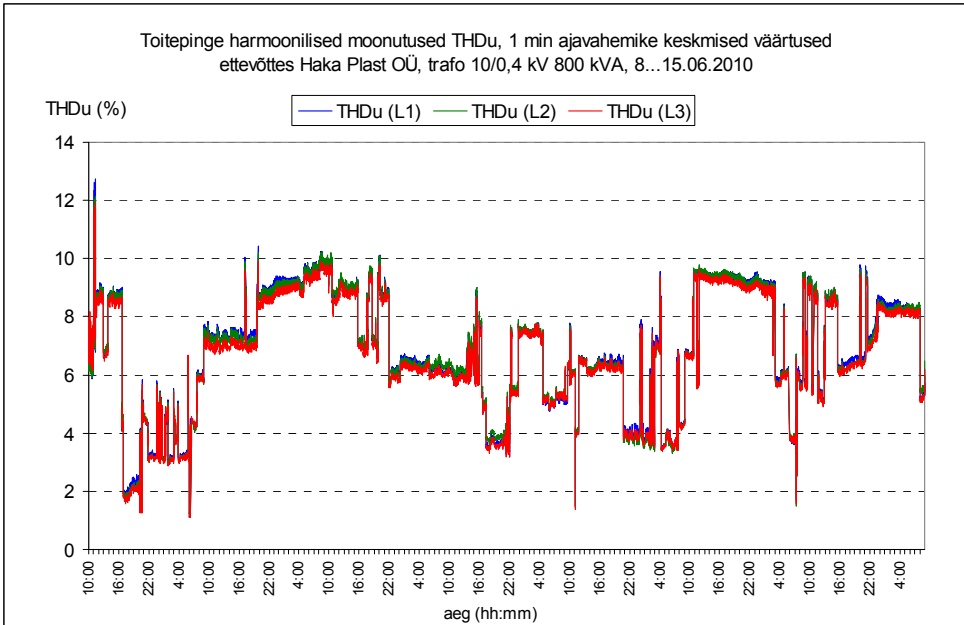
Joonis 14. Suured pingehälbed (pingelohud ja liigpinged) ning suur pingete asümmeetria tööstusettevõtte 0,4 kV peakilbis avarii tõttu ülekandevõrgus ca 2 tunni vältel



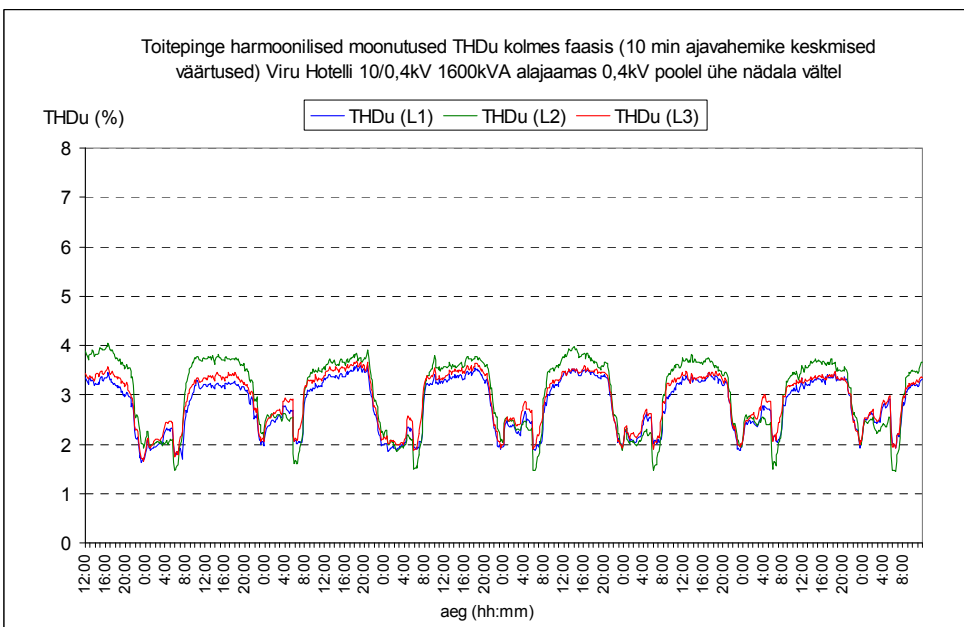
Joonis 15. Liigpinged hoone peakilbis neutraaljuhi liiga suure takistuse ja asümmeetrilise koormuse tõttu



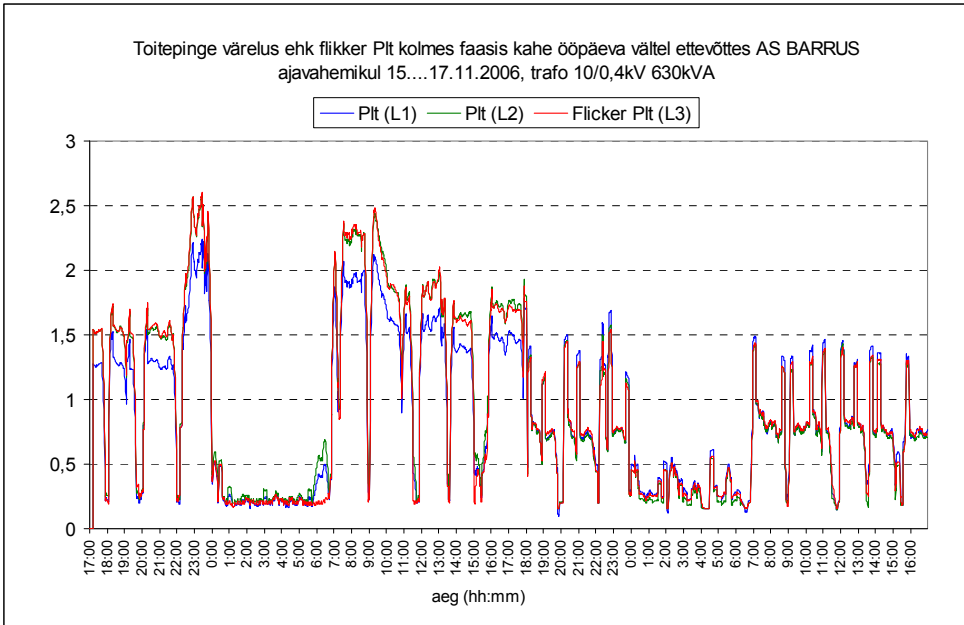
Joonis 16. Toitepinge harmoonilised moonutused THDu (%) ettevõttes Harju Elekter, trafo 10/0,4 kV 630 kVA



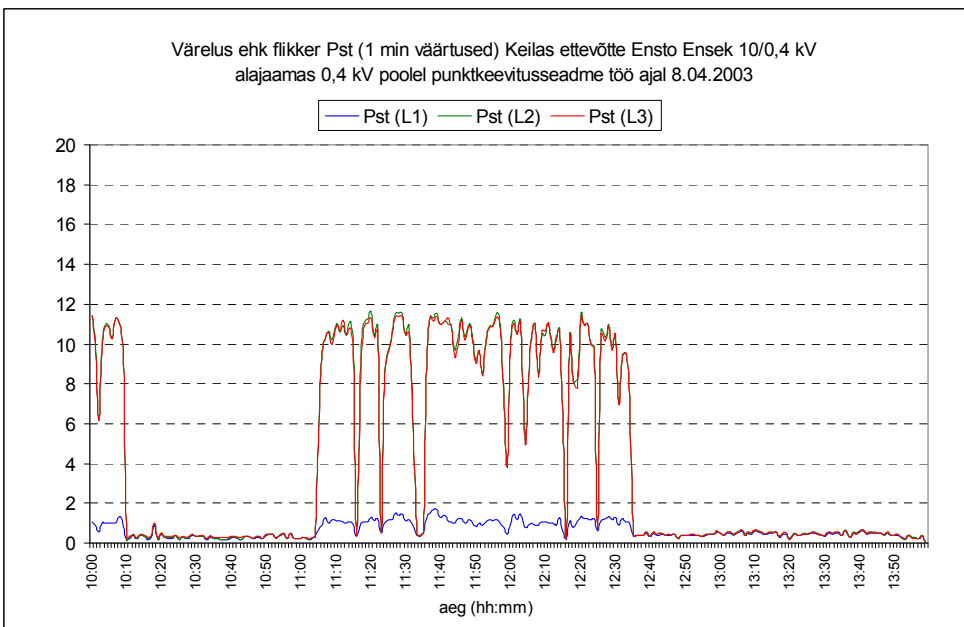
Joonis 17. Toitepinge harmoonilised moonutused THDu ühe nädala vältel ettevõttes Haka Plast OÜ, moonutusi põhjustavad plasttoruliinide alalisvooluajamid



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



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



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

## **DISSERTATIONS defended at Tallinn University of Technology on Power Engineering, Electrical Engineering and Mining Engineering**

1. **Jaan Tehver**. Boiling on Porous Surface. 1992.
3. **Endel Risthein**. Electricity Supply of Industrial Plants. 1993.
4. **Tõnu Trump**. Some New Aspects of Digital Filtering. 1993.
5. **Vello Sarv**. Synthesis and Design of Power Converters with Reduced Distortions Using Optimal Energy Exchange Control. 1994.
6. **Ivan Klevtsov**. Strained Condition Diagnosis and Fatigue Life Prediction for Metals under Cyclic Temperature Oscillations. 1994.
7. **Ants Meister**. Some Phase-Sensitive and Spectral Methods in Biomedical Engineering. 1994.
8. **Mati Meldorf**. Steady-State Monitoring of Power System. 1995.
9. **Jüri-Rivaldo Pastarus**. Large Cavern Stability in the Maardu Granite Deposit. 1996.
10. **Enn Velmre**. Modeling and Simulation of Bipolar Semiconductor Devices. 1996.
11. **Kalju Meigas**. Coherent Photodetection with a Laser. 1997.
12. **Andres Udal**. Development of Numerical Semiconductor Device Models and Their Application in Device Theory and Design. 1998.
13. **Kuno Janson**. Paralleel- ja järjestikresonantsi parameetrilise vaheldumisega võrgusageduslik resonantsmuundur ja tema rakendamine. 2001.
14. **Jüri Joller**. Research and Development of Energy Saving Traction Drives for Trams. 2001.
15. **Ingo Valgma**. Geographical Information System for Oil Shale Mining – MGIS. 2002.
16. **Raik Jansikene**. Research, Design and Application of Magnetohydrodynamical (MHD) Devices for Automation of Casting Industry. 2003.
17. **Oleg Nikitin**. Optimization of the Room-and-Pillar Mining Technology for Oil-Shale Mines. 2003.
18. **Viktor Bolgov**. Load Current Stabilization and Suppression of Flicker in AC Arc Furnace Power Supply by Series-Connected Saturable Reactor. 2004.
19. **Raine Pajo**. Power System Stability Monitoring – an Approach of Electrical Load Modelling. 2004.
20. **Jelena Shuvalova**. Optimal Approximation of Input-Output Characteristics of Power Units and Plants. 2004.
21. **Nikolai Dorovatovski**. Thermographic Diagnostics of Electrical Equipment of Eesti Energia Ltd. 2004.
22. **Katrin Erg**. Groundwater Sulphate Content Changes in Estonian Underground Oil Shale Mines. 2005.
23. **Argo Rosin**. Control, Supervision and Operation Diagnostics of Light Rail Electric Transport. 2005.
24. **Dmitri Vinnikov**. Research, Design and Implementation of Auxiliary Power Supplies for the Light Rail Vehicles. 2005.
25. **Madis Lehtla**. Microprocessor Control Systems of Light Rail Vehicle Traction Drives. 2006.

26. **Jevgeni Šklovski.** LC Circuit with Parallel and Series Resonance Alternation in Switch-Mode Converters. 2007.
27. **Sten Suuroja.** Comparative Morphological Analysis of the Early Paleozoic Marine Impact Structures Kärkla and Neugrund, Estonia. 2007.
28. **Sergei Sabanov.** Risk Assessment Methods in Estonian Oil Shale Mining Industry. 2008.
29. **Vitali Boiko.** Development and Research of the Traction Asynchronous Multimotor Drive. 2008.
30. **Tauno Tammeoja.** Economic Model of Oil Shale Flows and Cost. 2008.
31. **Jelena Armas.** Quality Criterion of road Lighting Measurement and Exploring. 2008.
32. **Olavi Tammemäe.** Basics for Geotechnical Engineering Explorations Considering Needed Legal Changes. 2008.
33. **Mart Landsberg.** Long-Term Capacity Planning and Feasibility of Nuclear Power in Estonia under Certain Conditions. 2008.
34. **Hardi Torn.** Engineering-Geological Modelling of the Sillamäe Radioactive Tailings Pond Area. 2008.
35. **Aleksander Kilk.** Paljupooluseline püsimagnetitega sünkroongeneraator tuuleagregaatidele. 2008.
36. **Olga Ruban.** Analysis and Development of the PLC Control System with the Distributed I/Os. 2008.
37. **Jako Kilter.** Monitoring of Electrical Distribution Network Operation. 2009.
38. **Ivo Palu.** Impact of Wind Parks on Power System Containing Thermal Power Plants. 2009.
39. **Hannes Agabus.** Large-Scale Integration of Wind Energy into the Power System Considering the Uncertainty Information. 2009.
40. **Kalle Kilk.** Variations of Power Demand and Wind Power Generation and Their Influence to the Operation of Power Systems. 2009.
41. **Indrek Roasto.** Research and Development of Digital Control Systems and Algorithms for High Power, High Voltage Isolated DC/DC Converters. 2009.
42. **Hardi Hõimoja.** Energiatõhususe hindamise ja energiasalvestite arvutuse meetodika linna elektertranspordile. 2009.
43. **Tanel Jalakas.** Research and Development of High-Power High-Voltage DC/DC Converters. 2010.
44. **Helena Lind.** Groundwater Flow Model of the Western Part of the Estonian Oil Shale Deposit. 2010.
45. **Arvi Hamburg.** Analysis of Energy Development Perspectives. 2010.
46. **Mall Orru.** Dependence of Estonian Peat Deposit Properties on Landscape Types and Feeding Conditions. 2010.
47. **Erik Väli.** Best Available Technology for the Environmentally Friendly Mining with Surface Miner. 2011.
48. **Tarmo Tohver.** Utilization of Waste Rock from Oil Shale Mining. 2011.
49. **Mikhail Egorov.** Research and Development of Control Methods for Low-Loss IGBT Inverter-Fed Induction Motor Drives. 2011.

