

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
Elektrotehnika instituut

ATM70LT

Ott Antsmaa

**ELEKTRITOOTMISSEADMETE MÕJU  
ANALÜÜS JAOTUSVÕRGU TALITLUSELE JA  
PINGE KVALITEEDILE**

Magistritöö

Instituudi direktor ..... prof. Tõnu Lehtla

Juhendaja ..... prof. Kuno Janson

Lõpetaja ..... Ott Antsmaa

Tallinn 2013

## **AUTORIDEKLARATSIOON**

Kinnitan, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus. Kõik selle koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud. Varem ei ole selle alusel kutse- ega teaduskraadi ega inseneridiplomit taotletud. Töö on koostatud litsentseeritud tarkvara abil.

Tallinn, 5.06.2014.a.

..... Ott Antsmaa

ATM70LT

## **Elektritootmiseseadmete mõju analüüs jaotusvõrgu talitlusele ja pingekvaliteedile**

**Ott Antsmaa**, üliõpilaskood 111734AAAM, juuni 2014. – 82 lk.

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Energeetikateaduskond

Elektrotehnika instituut, elektrimasinate õppetool

Töö juhendaja: Kuno Janson

**Võttesõnad:** jaotusvõrk, hajatootmine, pingekvaliteet, lühisvoolud

### **Referaat:**

Lõputöö on 83 lehel, sisaldab 12 tabelit ja 44 joonist.

Käesoleva lõputöö eesmärk on analüüsida elektritootmiseseadmete mõju jaotusvõrgu pingekvaliteedile ja kaitseseadmete toimimisele ning luua soovitude kogum nende mõjude hindamiseks.

Kasutades üldtunnustatud standardeid ja uurimustöid tehakse ülevaade probleemide teoreetilistest alustest ning esitatakse vajalikud arvutusvalemid ja hindamismetoodikad. Tuuakse välja reaalsel ja fiktiivsetel võrguosadel põhinevaid erinevaid arvutusnäiteid.

Lõputöö käigus läbi viidud analüüsi tulemusena esitatakse algoritmid elektritootmiseseadmete liitumisele eelnevate analüüside tegemiseks. Esitatud teoreetilisi järeldusi võrreldakse Elektrilevi OÜ võrgus elektritootmiseseadmete liitumispunktides läbiviidud mõõtetulemustega.

ATM70LT

**Analysis of the impact of embedded generation on distribution network operation and power quality**

**Ott Antsmaa**, student code 111734AAAM, May 2013. – 83 pages

TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY \* Faculty of Power Engineering

Department of Electrical Engineering

Chair of Electrical Machines

Tutor of the work: professor Kuno Janson

**Key words:** distribution network, embedded generation, power quality, fault currents

**Summary:**

The work has 83 sheets, includes 12 tables, and 44 drawings

The goal of current thesis is to analyse the impact of embedded generation on distribution network power quality and on operation of protection devices. Target is to create a set of recommendations for evaluating these impacts.

The overview of theoretical basis of problems, calculation formulas and proper assessment methodologies is made using recognized international standards and researches. The work includes calculation and assessment examples based on real and fictional parts of distribution network.

The result of current thesis and carried out analysis are different problem solving algorithms for assessing the connection probability of embedded generators. Theories for these assessment procedures and limit values are compared with actual measurements taken at different generator connection points on the distribution grid of Elektrilevi OÜ.

ATM70LT

**Аналитическое исследование влияния электрогенерирующих установок на режим работы и качество электроэнергии распределительных сетей**

**Отт Антсмаа**, студенческий код 111734АААМ, июнь 2014. – 83 стр.

ТАЛЛИНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Энергетический факультет

Институт электротехники, учебный стол электропривода и электроснабжения

Руководитель работы: профессор Куно Янсон

**Ключевые слова:** распределительная сеть, рассредоточенная (распределённая) выработка электроэнергии, качество электроэнергии, токи короткого замыкания

**Реферат:**

Выпускная работа содержит 83 листов, 12 таблиц и 44 рисунков.

Целью работы являются исследование влияния отдельно стоящих установок генерации электроэнергии на качество электроэнергии и функционирование устройств защиты в распределительных сетях, а также выработка рекомендаций для оценки этих влияний.

На основании общих стандартов и исследовательских работ выполнен обзор теоретических основ исследуемых проблем и представлены необходимые расчётные выражения и методики оценки. Приводятся различные примеры расчётов, выполненных для реальных и предполагаемых участков сети.

В качестве результатов выполненного по ходу выпускной работы анализа представлены алгоритмы для проведения оценок, предшествующих подключению генерирующих установок. Представленные в работе теоретические положения сравниваются с результатами измерений, произведёнными в сети Elektrilevi OÜ около электрогенерирующих установок.

## SISUKORD

MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE .....	8
1. SISSEJUHATUS.....	10
2. JAOTUSVÕRGUST ÜLDISELT .....	12
2.1. Keskpingevõrk.....	12
2.2. Madalpingevõrk.....	13
2.3. Elektritootmisseadmed jaotusvõrgus .....	14
3. PINGE TUNNUSSUURUSED .....	16
3.1. Toitepinge aeglased muutused.....	16
3.2. Üksik kiire pingemuutus.....	20
3.3. Värelustugevus .....	23
3.4. Kõrgemad harmoonikud .....	26
4. LÜHISVOOLUD JA KAITSE.....	30
4.1. Lühisvoolude arvutamine .....	30
4.2. Tootmisseadmete lühisvoolud .....	33
4.3. Lühisvoolude nivoo .....	39
4.4. Kaitserakendumine .....	40
5. LAHENDUSALGORITMID JA ARVUTUSNÄITED.....	43
5.1. Toitepinge aeglased muutused.....	43
5.2. Üksik kiire pingemuutus.....	45
5.3. Värelustugevus .....	48
5.4. Kõrgemad harmoonikud .....	52
5.5. Seadmete dünaamiline ja termiline taluvus .....	55
5.6. Kaitserakendumine .....	60
6. MÕÕTETULEMUSI ELEKTRITOOTJATE JUURES .....	66
6.1. Elektritootjate loetelu .....	66
6.2. Toitepinge aeglased muutused.....	66
6.3. Üksik kiire pingemuutus.....	70

6.4. Värelostugevus .....	74
6.5. Kõrgemad harmoonikud .....	77
7. KOKKUVÕTE.....	79
KASUTATUD KIRJANDUS .....	81

# TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

## Elektrotehnika instituut

KOOSKÕLASTATUD

Prof. T. Lehtla.....

..... 2014

### **MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE**

Ott Antsmaa, üliõpilaskood 111734AAAM

Magistritöö teema: Elektritootmiseseadmete mõju analüüs jaotusvõrgu talitlusele ja pingele kvaliteedile.

Ülesanne: Uurida elektritootmiseseadmete võimalikke mõjusid jaotusvõrgu pingele kvaliteedile ja kaitseseadmete toimimisele. Anda soovitused tootmiseseadmete liitumisele eelnevateks analüüside läbiviimiseks ning võrrelda esitatud põhimõtteid jaotusvõrgus läbiviidud pingele kvaliteedi mõõtetulemustega.

#### Lähteandmed:

1. Pingekvaliteedi mõõtetulemused Elektrilevi OÜ võrgus
2. Rahvusvahelised standardid ja uurimustööd
3. Erialane kirjandus
4. Tootmiseseadmete andmelehed

#### Lahendamisele kuuluvate probleemide loetelu:

1. Selgitada pingele tunnussuuruste tekkemehhanisme ning elektritootmiseseadmete osa selles.
2. Luua hindamisalgoritmid elektritootmiseseadmete mõju hindamiseks pingele kvaliteedile.
3. Selgitada lühisvoolude arvutuspõhimõtteid ning uurida elektritootmiseseadmete võimet anda võrku lühisvoole.
4. Luua hindamisalgoritmid elektritootmiseseadmete mõju hindamiseks jaotusvõrgu primaarseadmete lühisvoolutaluvusele ja kaitseseadmete rakendumisele.



5. Võrrelda esitatud hindamismetoodikaid Elektrilevi OÜ võrgus läbiviidud pinge kvaliteedi mõõtetulemustega

Magistritöö esitada eesti keeles kahes eksemplaris koos eesti- ja kahe võõrkeelse referaadiga hiljemalt [09.06.2014](#).

Juhendaja:

Ülesande vastu võtnud:

Professor K. Janson .....

Üliõpilane O. Antsmaa .....

# 1. SISSEJUHATUS

Traditsiooniliselt on elektrisüsteemis elektrienergiat toodetud suurtes tsentraalsetes elektrijaamades. Nende jaamade võimsused ulatuvad sageli tuhandete megavattideni ning sellises mahus elektrienergia edastamiseks on need eranditult ühendatud põhivõrkudega. Põhivõrkude poolt ülekantav elektrienergia jaotamine lõpptarbijatele on ajalooliselt olnud jaotusvõrguettevõtjate ülesanne.

Seoses fossiilsete kütuste ammendumise, keskkonnakaitse ja elektrituru avanemise küsimustega pööratakse üha enam tähelepanu taastuvatel energiaallikatel põhinevate elektritootmislahenduste kasutuselevõtuks. Oluliseks tendentsiks on muutumas elektri hajatootmine, mis haarab väiksema ühikvõimsusega ja reeglina lõpptarbija lähedal paiknevaid elektrijaamu.

Hajatootmise mõistet on defineeritud erinevalt ning seda võib siduda näiteks võimsuse, liitumispinge või primaarenergiaallikaga. Sagedalt kasutavaks osutub määratlus, mille kohaselt on hajatootmiseseadmed erinevalt tsentraalsest elektrijaamadest ühendatud jaotusvõrkudega. Siin tekib põhimõtteline erisus, kuna jaotusvõrgud ei ole ajalooliselt planeeritud ega mõeldud talitlema tingimustes, kus võrgus paikneb suurel määral elektritootmiseseadmeid.

Käesoleva töö eesmärgiks on uurida ning analüüsida põhilisemaid elektritootmiseseadmete mõjusid, millega jaotusvõrguettevõtja peaks liitumisele eelnevalt arvestama. Vastavate hindamismetoodikate väljatöötamine on oluline selleks, et tagada jaotusvõrgu normaalne toimimine ja nõuetekohane pinge kvaliteet hajatootmise üha laiema leviku tingimustes. Elektritootmiseseadmete edukat integreerimist jaotusvõrguga loetakse üheks peamiseks eesmärgiks tarkvõrgu loomisel, mistõttu võivad töös esitatud tulemused osutada sisendiks ka selle tegevuse planeerimisel. Teataval määral võib tootmiseseadmete liitumisele eelnevaid analüüse leida erinevate riikide võrgustandarditest, millest ühed põhjalikumad on saksa riiklike asutuste poolt väljatöötatud juhendmaterjalid. Nendes esitatud nõuete ja võrguhäiringute piirmäärade kujundamise kohta puuduvad aga reeglina selgitused, mistõttu võivad need teatavatel juhtudel osutada liigselt piiravateks. Samuti puudub terviklik käsitlus, mis hõlmaks nii normaal- kui lühiserežiime ühtses dokumendis.

Töö põhiosa esimeses peatükis tehase lühiülevaade jaotusvõrgu ülesehitusest ja konfiguratsioonist ning vaadeldakse elektritootmisseadmete põhimõttelisi erisusi ja liigitust. Teine peatükk käsitleb pinge kvaliteeti ning selle tunnussuuruste arvutamist elektritootmisseadmete vaates. Põhiosa kolmandas peatükis keskendutakse lühisvoolude aspektile. Selgitatakse lühisvoolude arvutusmetoodikaid ning uuritakse erinevat tüüpi elektritootmisseadmete võimet anda võrku lühisvoolu. Käsitluse alla tuleb võimalik mõju primaarseadmete lühisvoolutaluvusele ja võrgu kaitseseadmete toimimisele.

Teoreetilisel analüüsil põhinev formuleeritakse lahendusalgoritmideks põhiosa neljandas peatükis. Selles esitatakse lisaks reaalsel või eeldatavatel oludel põhinevaid arvutusnäiteid väljatoodud algoritmide kasutamiseks. Viimases peatükis vaadeldakse Elektrilevi OÜ võrgus asuvate elektritootmisseadmete liitumispunktides läbiviidud pinge kvaliteedi mõõtetulemusi ning võrreldakse neid arvutuslike tulemustega.

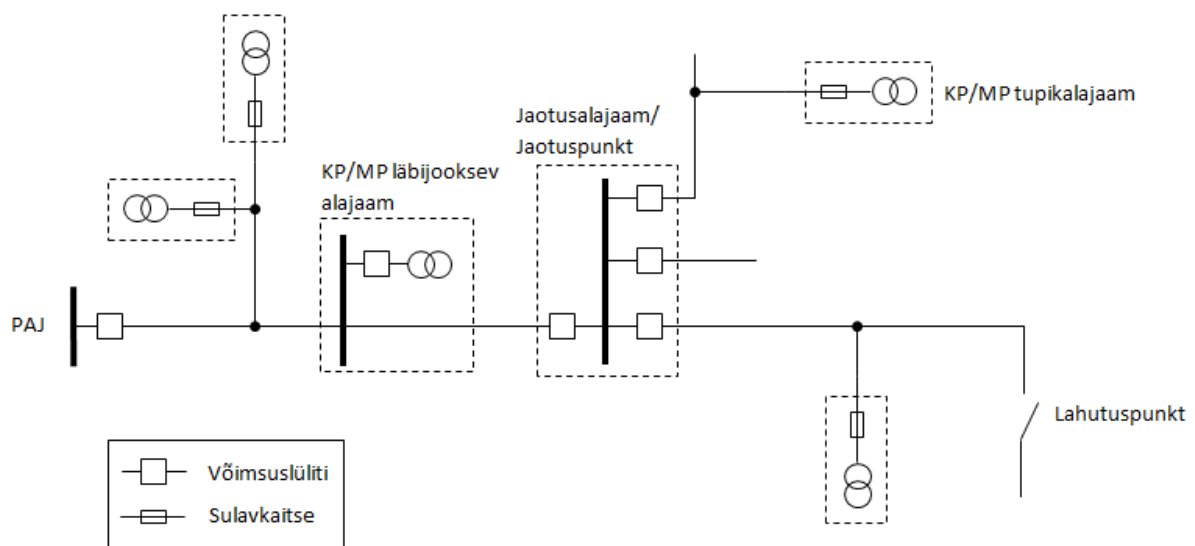
## 2. JAOTUSVÖRGUST ÜLDISELT

### 2.1. Keskpingevõrk

Keskpingevõrgud on reeglina välja ehitatud ring- ja silmusvõrkudena, kuid talitlevad peaaegu eranditult radiaalskeemi kohaselt. Ringide või silmustena on omavahel ühendatud kas erinevad piirkonnaalajaamad või sama piirkonnaalajaama erinevad sektsioonid. Piirkonnaalajaamaks võib Eestis oludes nimetada alajaama, kus toimub pingemuundamine 110 või 35 kV pingelt madalamale ja jaotamine keskpingel 6–20 kV.

Normaallahutuskohtade abil jagatakse keskpingevõrk radiaalselt talitlevateks fiidriteks. Keskpinge fiider ei koosne siiski vaid ühest harust, vaid sellel toimub hargnemisi. Harud võivad omakorda ühendada erinevaid keskpingefiidreid moodustades täiendavaid ringe. Keskpinge võrgu jaotus- või hargnemisfunktsiooni täitvaid alajaamu nimetatakse sõltuvalt liinilahtrite arvust jaotusalajaamadeks ja jaotuspunktideks. Alajaamad mille põhifunktsiooniks on pingel alandamine ja edastamine madalpingetarbijatele, nimetatakse keskpinge/madalpinge ehk KP/MP alajaamadeks (Joonis 3.1.).

Kaitsemeetmena leiavad keskpingel kasutamist sulavkaitsmed ja releekaitsega võimsuslülid. Kui keskpingefiidrit kaitstakse ning sektsioneeritakse võimsuslülitega siis sulavkaitsmed on kasutusel peamiselt KP/MP alajaamade jõutrafode kaitsetena.



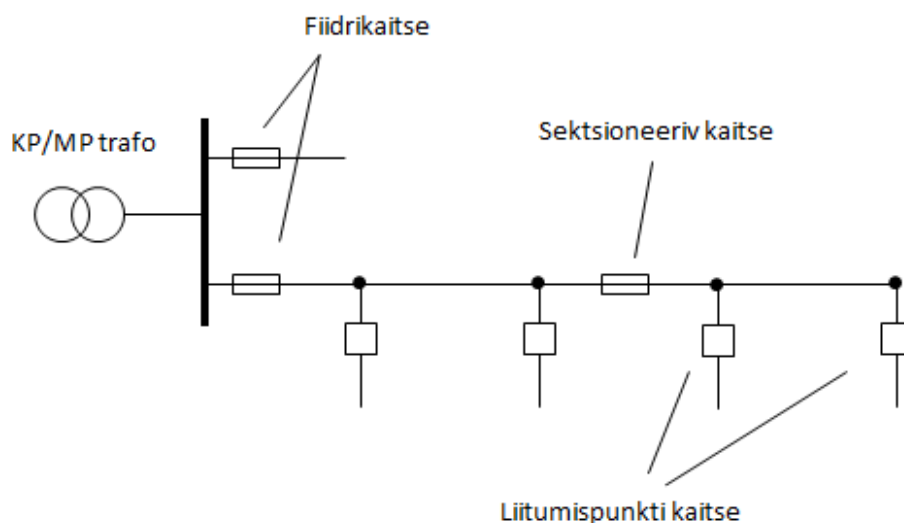
Joonis 3.1. Keskpingefiidri näidisskeem

Kaitserleedes kasutatakse reeglina ajast sõltuvat ning ajast sõltumatut liigvoolukaitset. Neid nimetatakse vastavalt ka maksimaalkaitseks ja voolulõikeks. Voolulõige on mõeldud töötama lühistelevõrgu ning toimib hetkkaitseks ja selle säte määratakse nii, et see ei rakenduks madalpingevõrgus esinevatele lühistelevõrgu. Maksimaalvoolukaitse on mõeldud töötama nii lühisele kui suurele ülekoormusele. Sätte määramisel on oluline tagada, et kaitse ei töötaks normaalkoormusele. Keskpinge sulavkaitsmed võivad olla ette nähtud nii lühise ja ülekoormuskaitseks kui ka ainult lühisekaitseks.

## 2.2. Madalpingevõrk

Madalpingevõrk on reeglina välja ehitatud radiaalvõrguna. Ringvõrguna ehitatud madalpingevõrku võib esineda tihedama asustusega piirkondades, kus see vaatamata sellele on seatud talitlema siiski radiaalsetena. Madalpingevõrk lähtub fiidritena KP/MP alajaamast. Fiidritel paiknevad madalpingekliendid.

Madalpingefiidrite ja fiidril paiknevate seksioneerivate kaitseaparatuuridena on enamasti kasutusel gG (gL) tüüpi rakendustunnusjoonega sulavkaitsmed või teatud juhtudel ka sätteregeerimisega kaitselülitid. Liitumispunkti kaitsetena kasutatakse käesoleval ajal C-tüüpi rakendustunnusjoonega kaitselüliteid. Varasemast ajast võivad liitumispunkti kaitsetena olla kasutusel ka sulavkaitsmed. Madalpingevõrgu põhimõtteline ülesehitus on toodud joonisel 3.2.



### Joonis 3.2. Madalpingevõrgu põhimõtteskeem

Elektrilevi OÜ jaotusvõrgus kehtivad üldnõuded määravad lühiskaitsele enamalt lubatava automaatse väljalülitamisaja nõude 5 sekundit. See tähendab, et minimaalne ühefaasiline lühisvool kõige kaugemas kaitstavas punktis peab tagama kaitseparaadi kindla rakendumise nõutud aja jooksul.

## 2.3. Elektritootmiseseadmed jaotusvõrgus

Jaotusvõrkudesse ühendatavad elektritootmiseseadmed võivad mitmeti erineda. Erisustest sõltub oluliselt nende mõju võrgule, mistõttu on igasuguse reeglístiku koostamise eelduseks mingisugune diferentseerimine ja liigitamine.

Üheks peamiseks aluseks mille abil elektritootmiseseadmeid liigitada on primaarenergia allikas, kuna selle kättesaadavusest oleneb otsesel määral väljundaktiivvõimsus. Laias laastus võib primaarenergia alusel elektritootmiseseadmed jagada nii:

- soojuselektrijaamad
- tuuleelektrijaamad
- päikeseelektrijaamad
- hüdroelektrijaamad

Selline liigitamine on pigem oluline üldisest elektrisüsteemi aspektist, kuna aktiivvõimsusest sõltuvad otseselt sageduse reguleerimisega seonduvaid nõudeid. Siiski mõjutavad kõikumised primaarenergias muutusi ka võrgupinges ja erisused tekivad ka pinge kvaliteedi aspektist.

Teine võimalus jaotusvõrguga liituvate elektritootmiseseadmete liigitamiseks on seda teha genereeriva seadme tüübi alusel. Käesolevas töös käsitletakse mitmeid aspekte alljärgneva jaotuse alusel:

- sünkroongeneraator
- lühisrootoriga asünkroongeneraator
- rootoriahelas oleva takistiga asünkroongeneraator

- kaksistoitega asünkroongeneraator
- muunduril põhinev tootmiseseade

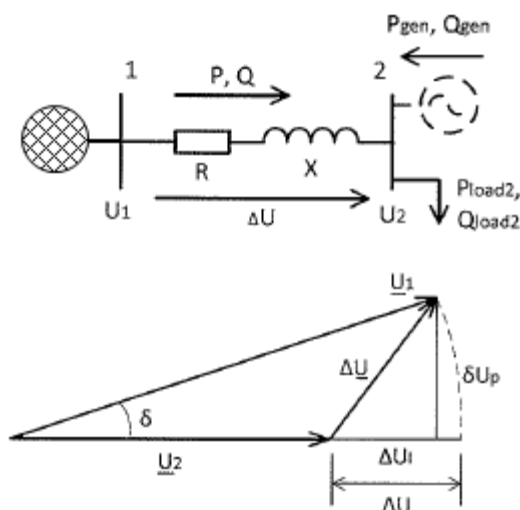
Genereeriva allika tüübist sõltub mõju pinge kvaliteedile lülitusoperatsioonide teostamisel, käitumine lühiseolukorras ning tootmiseseadmete võime osaleda võrgupinge reguleerimisel.

### 3. PINGE TUNNUSSUURUSED

#### 3.1. Toitepinge aeglased muutused

Aeglaseks pingemuutuseks nimetatakse pinge efektiivväärtuse suurenemist ja vähenemist, mis tavaliselt on tingitud koormuse muutumisest [1]. Selleks, et mõista kuidas koormuse muutumine mõjutab toitepinget vaatleme püsitalitluse arvutamise põhimõtteid.

Kuna jaotusvõrgud talitlevad radiaalsetena soovitatakse arvutamisel rakendada lihtsat kahekäigulist iteratsiooniprotsessi, milles esmalt arvutatakse võimsuskaod ja võimsusvood liinides, alustades fiidri lõpust ja seejärel pinged sõlmedes alustades punktist, kus pinge loetakse teada olevateks [2]. Lihtsat liinilõiku on kujutatud joonisel 3.1.



Joonis 3.1. Pingekao arvutamine liinilõigis

Kuna jaotusvõrgu mistahes elemendi sisend- ja väljundpinge vektorite vaheline nurk  $\delta$  on väike, siis võib pingekao lugeda võrdseks pingelangu pikikomponendiga  $\Delta U \approx \Delta U_1$  [2]. Kui liinilõigu kohta on teada ka selle kaudu edastatav aktiiv- ja reaktiivvõimsus ning takistused avaldub pingemuut vastavalt valemile 3.1.

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U_1}, \quad (3.1)$$

kus  $\Delta U$  – pingemuutus,



P – aktiivvõimsus,  
Q – reaktiivvõimsus,  
R – liinilõigu aktiivtakistus,  
X – liinilõigu reaktiivtakistus,  
U<sub>1</sub> – pinge alglähend.

Pinge alglähendiks U<sub>1</sub> võib lugeda nimipinge või varasema seisundi teadaoleva pinge.

Arvutatud tulemuse alusel saab leida suhtelise pingemuutuse, mille võib avaldada mõne kokkulepitud suuruse, näiteks nimipinge, suhtes. Sellisel juhul avaldub suhteline väärtus vastavalt valemile 3.2.

$$dU = \frac{\Delta U}{U_n}, \quad (3.2)$$

kus U<sub>n</sub> – võrgu nimipinge.

Elektritootmisseadmed mõjutavad jaotusvõrgu püsitalitluse pinget võrku antava või võrgust võetava aktiiv- ja reaktiivvõimsusega. Teades neid parameetreid on võimalik arvutada ühe tootmisseadme liitumisest tulenev maksimaalne võimalik suhteline pingetõus. Tootmisseadmete poolt põhjustatud pingetõus ei tohi põhjustada väljumist jaotusvõrgule seatud üldistest normidest. Normaaltalitlustingimustes, välja arvatud katkestused ei tohi madalpingel toitepinge aeglased muutused ületada ± 10 % nimipingest U<sub>n</sub>. Keskipingel peavad muutused jääma vahemikku ± 10 % lepingulisest pingest U<sub>c</sub> [1].

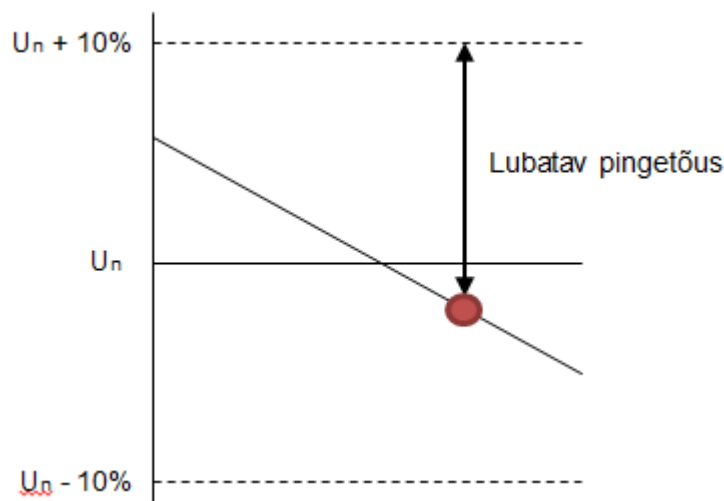
Liitva elektrijaama püsitalitlusest põhjustatud pingemuutuse arvutamise järel tuleb leitud suhteväärtust hinnata liitmispunktile iseloomuliku pingetaseme suhtes, kuna on selge, et see on radiaalliini lõikes erinev ning sõltub sellel paiknevast koormusest. Arvestada tuleb, et normaalset talitluspinget hoitakse pingekadude kompenseerimiseks nimipingest kõrgemal (Tabel 3.1).

Tabel 3.1. Nimi- ja talitluspinged Eesti jaotusvõrkudes

Nimipinge, kV	0,4	6	10	15	20	35
Talitluspinge, kV	0,41	6,3	10,5	15,75	21	36,75

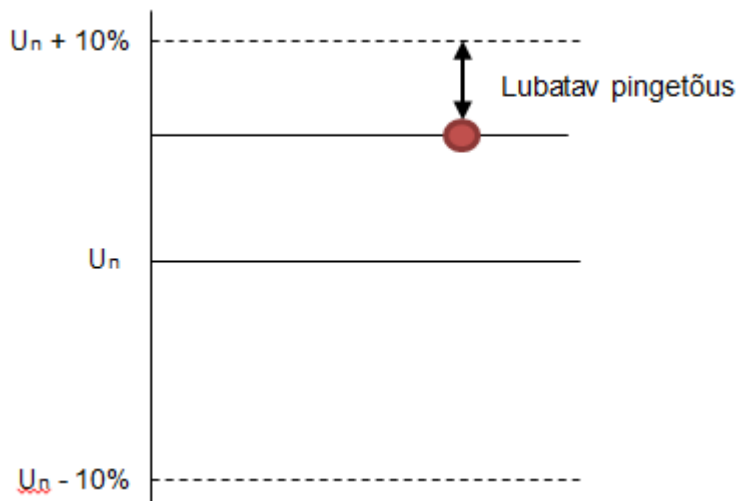
Tabelis 3.1 toodud talitluspinge väärtused tagatakse piirkonnaalajaamades, mille jõutrafod on automaatselt koormuse all reguleeritavad. See tähendab, et tootmisest põhjustatud võimaliku pingemuudu hindamisel peab keskpinge liitumise korral arvestama ainult piirkonnaalajaama lattide ja liitumispunkti vahel oleva takistusega, aga madalpingel ka vastava keskpingevõrgu takistusega.

Liitumispunktile iseloomuliku pingetaseme leidmiseks on tarvis määrata võrguosa minimaalne võimalik tarbimiskoormus (Joonis 3.2). Selle võib määrata olemasolevate mõõteandmete või muu kokkulepitud koormuse määramise meetoodika alusel.



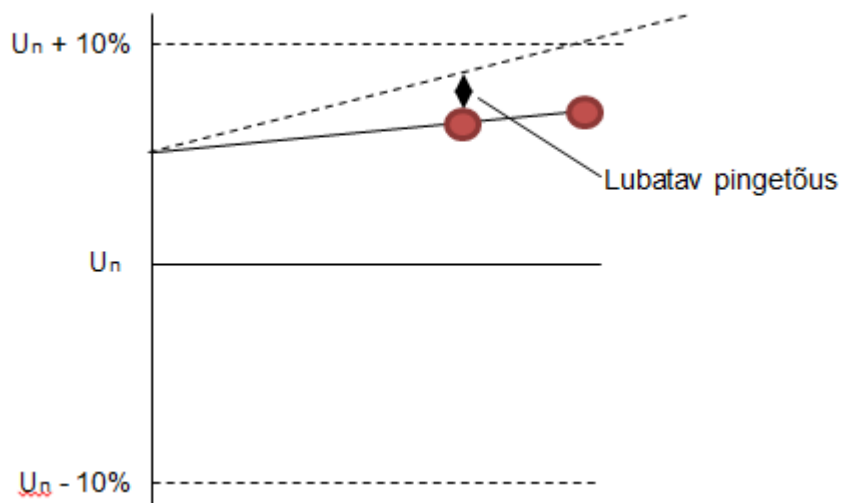
Joonis 3.2. Lubatav pingetõus juhul kui on määratud võrguosa minimaalne koormus.

Piisavalt täpsed või usaldusväärsed andmed võrguosa koormatuse kohta ei ole alati teada. Samuti ei pruugi liiga põhjalik olemasoleva ja prognoositava koormuse analüüsimine olla praktiline arvestades selleks kuluvat aega. Lihtsa ja konservatiivse lähenemisena võib võtta aluseks olukorra, kus tarbimine kogu võrguosa lõikes puudub. Sellisel juhul vaadeldakse maksimaalset pingemuutust tabelis 3.1 toodud talitluspingete suhtes (Joonis 3.3).



Joonis 3.3. Lubatav pingetõus juhul kui koormus vaadeldavas võrguosas puudub

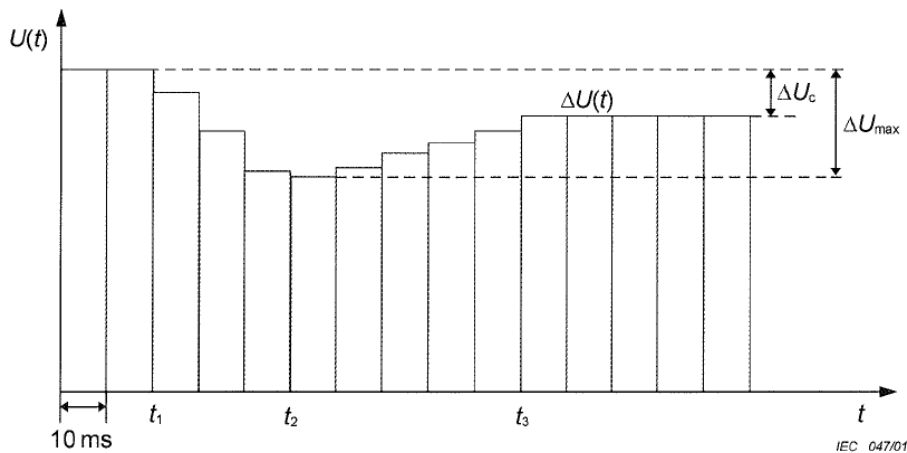
Juhul kui vaadeldavas võrguosas paikneb täiendavaid elektritootmisseadmeid tuleb arvestada ka nende poolt põhjustatud pingetõusuga. Siinkohal võib tekkida olukord, kus liituv elektritootmiseade ei põhjusta pingemuutuste väljumist lubatud piiridest vaadeldavas liitumispunktis, kuid teeb seda teistes võrgus paiknevates liitumispunktides (Joonis 3.4).



Joonis 3.4. Lubatav pingetõus arvestades teisi elektritootmisseadmeid

## 3.2. Üksik kiire pingemuutus

Kiireks pingemuutuseks nimetatakse pinge efektiivväärtuse kiiret üksikmuutust kahe püsiva, kuid täpsustamata kestusega järjestikuse taseme vahel [1]. Nähtust saab selgitada karakteristiku  $\Delta U(t)$  abil (Joonis 3.5) [3].



Joonis 3.5. Pingemuutuse astmikdiagramm

Elektrienergia tootmiseseadmed põhjustavad kiireid pingemuutusi lülitusoperatsioonide teostamisel. Nendeks võivad olla tootmiseseadmete võrku ja võrgust välja lülitumine või tootmiseseadmete vaheline lülitamine (näiteks generaatorite ümberlülitamine elektrituulikus).

Lülitamisest põhjustatud suurim pingemuutus kahe määratud taseme vahel avaldub vastavalt valemile 3.6.

$$\Delta U_{max} = U(t_1) - U(t_2), \quad (3.6)$$

kus  $\Delta U_{max}$  – maksimaalne pingemuutus,

$U(t_1)$  – lülitamisele vahetult eelnev pinge efektiivväärtus,

$U(t_2)$  – lülitamisele eelnevast enimalt erinev pinge efektiivväärtus lülitusoperatsioonil.

Tootmiseseadmete talitlusega seotud kiirete pingemuutuste hindamiseks on tarvilik teada lülitusprotsesside käigus toimuvaid muutusi aktiiv- ja reaktiivvõimsuses või vastavates vooludes. Selleks on kasutusel termin lülitusvoolukordsus [4], mis avaldub vastavalt valemile 3.7.

$$k_{imax} = \frac{I_a}{I_n}, \quad (3.7)$$

kus  $k_{imax}$  – lülitusvoolukordsus,  
 $I_a$  – suurim lülitusoperatsioonil esinev voolu väärtus,  
 $I_n$  – tootmiseadme nimivool.

Kuna lülitamistoimingust põhjustatud pingemuutus esineb oluliselt lühema ajaperioodi jooksul kui koormuse sujuvast tõstmisest või langetamisest põhjustatud aeglane pingemuutus, tuleb arvutamisel arvestada kogu elektrisüsteemi resulteeriva takistusega vaadeldavas punktis. Seetõttu osutub mugavamaks suhtelise pingemuutuse avaldamine võrgu lühisvõimsuse kaudu vastavalt valemitele 3.8 ja 3.9.

$$S_k = \frac{U_n^2}{Z}, \quad (3.8)$$

kus  $S_k$  – liitumispunkti lühisvõimsus,  
 $Z$  – liitumispunkti resulteeriv näivtakistus.

$$dU = k_{imax} \frac{S_n}{S_k} \cos(\varphi + \psi), \quad (3.9)$$

kus  $S_n$  – tootmiseadme niminäivvõimsus,  
 $\varphi$  – tootmiseadme faasinihkenurk käivitamisel (loetakse positiivseks kui mahtuvuslik ja negatiivseks kui induktiivne),  
 $\psi$  – liitumispunkti näivtakistuse nihkenurk.

Kiire pingemuutuse arvutamiseks kasutatakse lülitusvoolukordsuse kõrval ka pingemuutustegureid  $k_u(\psi_k)$  [5]. Sellisel juhul avaldub pingemuutus vastavalt valemile 3.10.

$$dU = k_u(\psi_k) \cdot \frac{S_n}{S_k} \quad (3.10)$$

Viimaste kasutamine on levinud tuule- ja päikeseelektrijaamade juures ning need tuuakse sageli välja tootmisseedmete tüübikatsetuste protokollis (Joonis 3.6).

Case of switching operation	Start-up at cut-in wind speed			
Max. number of switching operations, $N_{10}^*$	1			
Max. number of switching operations, $N_{120}^*$	6			
Network impedance phase angle, $\Psi_k$ (deg.)	30	50	70	85
Flicker step factor, $K_f(\Psi_k)$	0,1	0,2	0,2	0,2
Voltage change factor, $K_u(\Psi_k)$	0,2	0,2	0,3	0,3

Case of switching operation	Start-up at rated wind speed			
Max. number of switching operations, $N_{10}^*$	1			
Max. number of switching operations, $N_{120}^*$	1			
Network impedance phase angle, $\Psi_k$ (deg.)	30	50	70	85
Flicker step factor, $K_f(\Psi_k)$	0,6	0,6	0,6	0,6
Voltage change factor, $K_u(\Psi_k)$	1,2	1,2	1,2	1,2

Case of switching operation	Worst case switching between generators			
Max. number of switching operations, $N_{10}^*$	1			
Max. number of switching operations, $N_{120}^*$	6			
Network impedance phase angle, $\Psi_k$ (deg.)	30	50	70	85
Flicker step factor, $K_f(\Psi_k)$	0,6	0,6	0,6	0,6
Voltage change factor, $K_u(\Psi_k)$	1,0	1,2	1,3	1,3

Joonis 3.6. Väljavõte 2,3 MW nimivõimsusega Siemens elektrituuliku tüübikatsetuste protokollist

Üksiku kiire pingemuutuse hindamine on eelkõige oluline asünkroongeneraatorite korral, kus võrku lülitamisel võivad esineda suured voolutõuked. Mootorina käivitamisel võib voolukordsus ulatuda 5 – 7 kordse nimivooluni [6].

Sünkroongeneraatorite võrku lülitamine toimub reeglina täppissünkroniseerimise järel. Kiire pingemuutuse kontrollimise asemel võib seada nõuded sünkroniseerimise täpsusele. Näited vastavatest nõuetest on toodud tabelis 3.2.

Tabel 3.2. Täppissünkroniseerimisele esitatavad nõuded erinevates standardites

Standard/võrgueeskiri	Käsitlusala	Nõuded		
		$\Delta\phi$	$\Delta f$	$\Delta U$
BDEW [4]	Liitumine keskpingel	10°	0,5 Hz	10%
VDE [7]	Liitumine madalpingel	10°	0,5 Hz	10%
IEEE [8]	0 – 0,5 MVA	20°	0,3 Hz	10%

	0,5 – 1,5 MVA	15°	0,2 Hz	5%
	1,5 – 10 MVA	10°	0,1 Hz	3%

Muunduritel põhinevate tootmiseseadmete korral tuleks võrku lülitamisel lähtuda seadmele omistatud pingemuutusteguritest  $k_u(\psi_k)$ .

Kiirete pingemuutuste piirmäärad elektriseadmetele nimivooluga kuni 75 A on määratud tootestandarditega [3] [9]. Nende kohaselt ei tohi seadme poolt põhjustatud suhteline pingemuutus  $dU$  ületada 4 %. Nõuete täitmist kinnitatakse vastavussertifikaatide väljastamisega.

Üle 75 A nimivooluga seadmetele spetsiifilised tootestandardid puuduvad, mistõttu tuleb kiireid pingemuutusi liitumisele eelnevalt objektipõhiselt hinnata. Piirväärtuste osas võib soovitusi leida IEC tehnilistest spetsifikatsioonidest ja raportitest [10] [11]. Enimalt lubatavad pingemuutused on seotud nende esinemise arvuga (Tabel 3.3).

Tabel 3.3. IEC soovituslikud piirmäärad kiiretele pingemuutustele

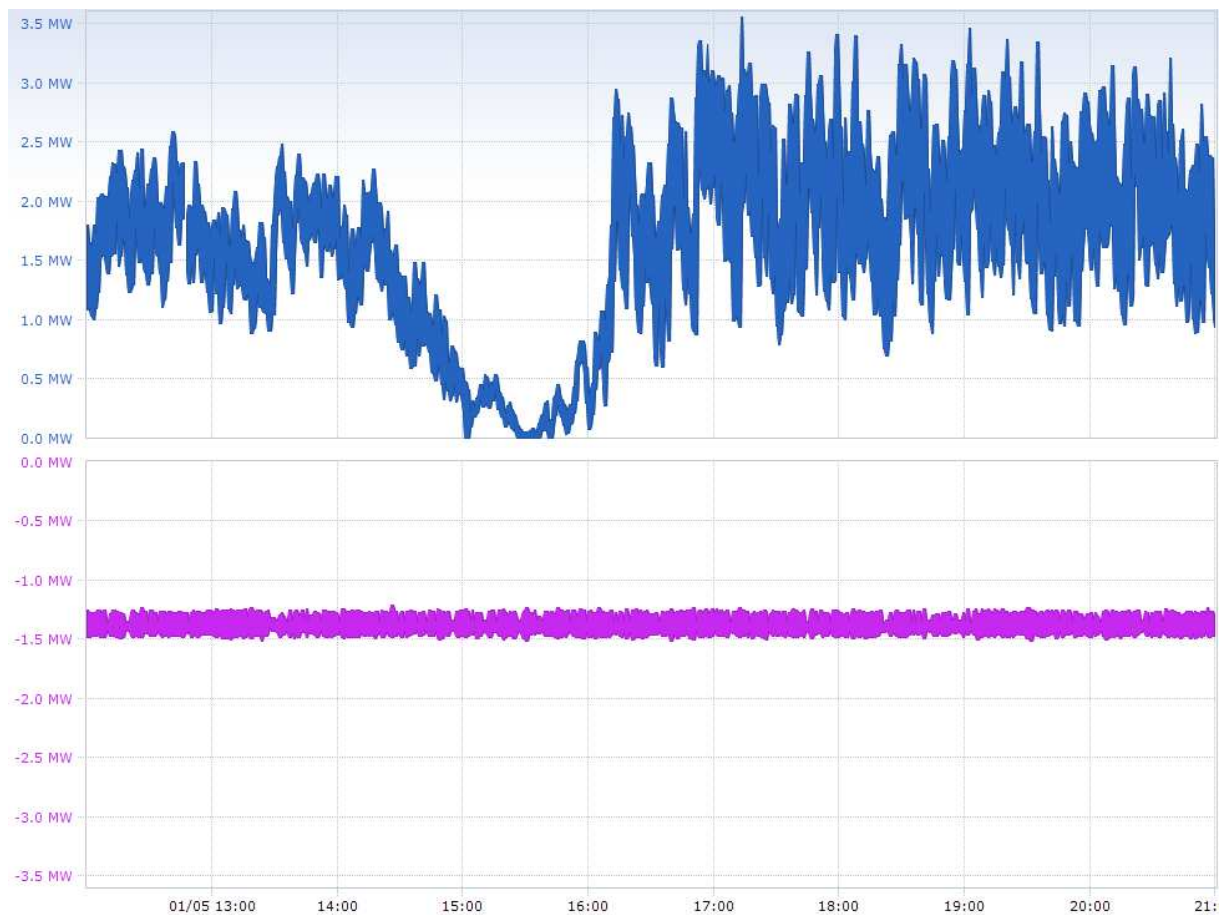
Pingemuutuste arv, n	Enimalt lubatav kiire pingemuutus, dU
$n \leq 4$ päevas	5 – 6 %
$n \leq 2$ tunnis ja $> 4$ päevas	4 %
$2 < n \leq 10$ tunnis	3 %

### 3.3. Värelustugevus

Pidevad kiired pingemuutused mingis ajaühikus põhjustavad lampide heleduse muutumist, mis võib tekitada väreluseks nimetatud nägemisilmingu. Väreluse häiriva toime intensiivsust hinnatakse järgmiste suurustega [1]:

- 10-minutilises ajavahemikus mõõdetud lühiajaline värelustugevus  $P_{st}$ ;
- pikaajaline värelustugevus  $P_{lt}$ , mis arvutatakse 2-tunnises ajavahemikus mõõdetud 12-st  $P_{st}$  väärtusest.

Kuna värelustugevus on seotud pingemuutustega ning viimane sõltub omakorda muutustest aktiiv- ja reaktiivvõimsuses mõjutavad värelustugevust avalikus elektrivõrgus eelkõige elektrienergia tootmisseadmed, mille primaarenergia kättesaadavus on suurel määral kõikuv. Joonisel 3.7 on toodud tuule- ja soojuselektrijaama väljundvõimsuse monitooringu võrdlus 8 tunni jooksul.



Joonis 3.7. Elektrilevi OÜ võrguga ühendatud tuule (ülal) - ja soojuselektrijaama (all) aktiivvõimsuse monitooring 8 tunni vältel.

Elektritootmisseadmete püsitalitluseset tulenev lühi- või pikaajaline värelustugevus liitumispunktis avaldub vastavalt valmile 3.11 [5].

$$P_{st} = P_{lt} = c(\psi_k) \cdot \frac{S_n}{S_k} \quad (3.11)$$

kus  $c(\psi_k)$  – tootmisseadme püsitalitluse värelustegur.



Mitme tootmiseadme korral summeeritakse väärtused vastavalt valemile 3.12.

$$P_{st\Sigma} = P_{lt\Sigma} = \frac{1}{S_k} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{wt}} (c_i(\psi_k, v_a) \cdot S_{n,i})^2} \quad (3.12)$$

kus  $N_{wt}$  – liitumispunkti ühendatud tootmiseadmete arv.

Elektritootmiseadmete liitumise tingimustes tuleb tagada värelustugevuse üldiste normide täitmine. Nii kesk- kui madalpingelises jaotusvõrgus peab normaalalitlustingimustes pikaajaline värelustugevus  $P_{lt}$  olema mis tahes nädalases ajavahemikus 95 % ajast väiksem või võrdne 1-ga [1].

Kuni 75 A nimivooluga seadmete puhul kehtivad sarnaselt kiiretele pingemuutustele tootestandardid. Nendes toodud pika- ja lühiajalise värelustugevuse emissiooni piirväärtused on vastavalt  $E_{Pst} \leq 1$  ja  $E_{Plt} \leq 0,65$  [3] [9].

Juhul kui seadmete nimivool ületab 75 A ei saa lähtuda tootestandarditest ning konkreetsele liitujale lubatav väreluse emissiooni piirväärtus tuleb leida juhtumipõhiselt. Madalpingel leitakse see vastavalt valemitele 3.13 ja 3.14 [10].

$$E_{Pst} = \sqrt[3]{\frac{S_i}{S_{TR}}} \quad (3.13)$$

$$E_{Plt} = 0,65 \cdot E_{Pst} \quad (3.14)$$

kus  $E_{Pst}$  – lühiajalise värelustugevuse emissiooni piirväärtus,  
 $E_{Plt}$  – pikaajalise värelustugevuse emissiooni piirväärtus,  
 $S_i$  – elektriijaama lubatud tootmisvõimsus,  
 $S_{TR}$  – vaadeldavat madalpingevõrku toitva jõutrafo niminäivvõimsus.

Keskpingevõrgus on lubatud väärtuste leidmine keerukam. Esmalt määratakse üldine keskpingevõrgule lubatav värelustugevuse piirmäär, mis avaldub vastavalt valemile 3.15 (sama valem kehtib ka pikaajalise värelustugevuse arvutustes) [11].

$$G_{PstMV} = \sqrt[3]{L_{PstMV}^3 - T_{PstUS}^3 \cdot L_{PstUS}^3} \quad (3.15)$$

kus  $G_{PstMV}$  – keskpingevõrku ühendatud seadmete summaarne lubatav värelustugevuse emissioon,

$L_{PstMV}$  – keskpingevõrgu värelustugevuse planeerimise piirmäär,

$L_{PstUS}$  – kõrgema pingega võrgu värelustugevuse planeerimise piirmäär,

$T_{PstUS}$  – värelustugevuse üleminekukoefitsient kõrgema pingega võrgult madalama pingega võrguosale.

Summaarse lubatava värelustugevuse piirmäära alusel leitakse lubatud emissioon liituvale elektri jaamale vastavalt valemile 3.16.

$$E_{Pst} = G_{PstMV} \cdot \sqrt[3]{\frac{S_I}{S_{TR}}} \quad (3.16)$$

Minimaalsed piirväärtused mida on IEC raporti kohaselt soovitatav ühele liitujale kohaldada on  $E_{Pst} \leq 0,35$  ja  $E_{Pit} \leq 0,25$ .

### 3.4. Kõrgemad harmoonikud

Kõrgemate harmoonikute mõiste on seotud siinuseliste võnkumistega mille sagedus on põhiseduse täisarvkordne. Seega saame elektrisüsteemis rääkida pinge ja voolu harmoonikutest, mis on sageduse, näiteks 50 Hz, täisarvkordsed. Kõrgemate harmoonikute esinemine moonutab põhiseduse siinuselist lainekuju. Elektrivõrkudes seatakse nõuded harmoonikute pingele, mida hinnatakse kas [1]:

- üksikult, harmooniku pingeline amplituudiga  $U_h$  põhikomponendi pingele  $U_1$  suhtes, kus  $h$  on harmooniku järk

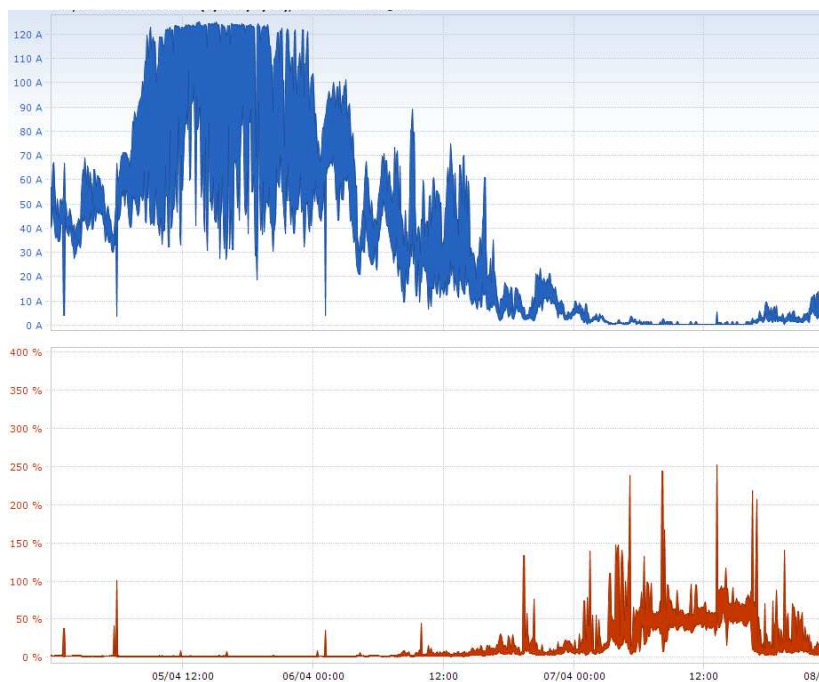
- ühiselt, nt. harmoonmoonutusteguriga THD

Pinge harmoonikuid põhjustavad sarnaselt eelnevalt vaadeldud pingemuutustele komplekstakistust läbivad vooluharmoonikud (Peatükk 3.1 ja 3.2). Nende allikaks omakorda on elektriseadmed, mille voolu-pinge tunnusjoon on mittelineaarne näiteks elektritootmisseadmed mis põhinevad jõuelektroonikamuunduritel.

Vooluharmoonikuid saab sarnaselt pingele esitada üksikult või harmoonmoonutusteguriga THD. Harmoonmoonutustegur näitab, kuivõrd on voolu kuju võrreldes põhisageduse siinuselise lainekujuga moonutatud. Ainult voolu harmoonmoonutusteguri vaatlemine võib aga olla eksitav, kuna vooluharmoonikute emissioon ei sõltu otseselt koguvoolu efektiivväärtusest. See tähendab, et väiksemate voolude juures on kõrgemate harmoonikute suhteline osakaal kõrgem ja vastupidi (Joonis 3.8).

Ülevaatlikum on hinnata vooluharmoonikuid nõudlusmoonutusteguri TDD abil (valem 3.17).

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_{max}} \quad (3.17)$$



Joonis 3.8. Elektrilevi OÜ võrguga ühendatud tuulepargi väljundvoolu efektiivväärtuse ning voolu harmoonmoonutusteguri monitooring 3 ööpäeva vältel

Pinge harmoonmoonutustegur THD ei tohi madal- või keskpingelistes avalikes elektrivõrkudes olla suurem kui 8 % [1]. Selle nõude tagamiseks hajatootmise tingimustes tuleb seada piirmäärad elektrijaamade poolt emiteeritavatele vooluharmonikutele.

Vooluharmonikute emissiooni piirmäärad seadmetele nimivooluga kuni 75 A kehtestatakse tootestandarditega [12] [13].

Keskpingevõrgus tuleb normväärtuste leidmisel esmalt leida üldine lubatav pingeharmonikute tase vastavalt valemile 3.18 [14].

$$G_{hMV} = \sqrt[\alpha]{L_{hMV}^\alpha - L_{hUS}^\alpha}, \quad (3.18)$$

kus  $G_{hMV}$  – lubatav pingeharmoniku suhteline tase keskpingevõrgus,  
 $L_{hMV}^\alpha$  – pingeharmoniku planeerimise piirmäärad keskpingel,  
 $L_{hUS}^\alpha$  – pingeharmoniku planeerimise piirmäärad kõrgemal pingel,  
 $\alpha$  – tegur vastavalt tabelile 3.4.

Tabel 3.4. Teguri  $\alpha$  väärtused

Harmoniku järk, $h_i$	$\alpha$
$i < 5$	1
$5 \leq i \leq 10$	1,4
$i > 10$	2

Pingeharmonikute emissioon  $E_{Uhi}$  liituvale jaamale avaldub vastavalt valemile 3.19.

$$E_{Uhi} = G_{hMV} \cdot \sqrt[\alpha]{\frac{S_i}{S_{TR}}} \quad (3.19)$$

Pingeharmonikute väärtused teisendatakse lubatavateks vooluharmonikuteks  $E_{Ihi}$  valemi 3.20 alusel.

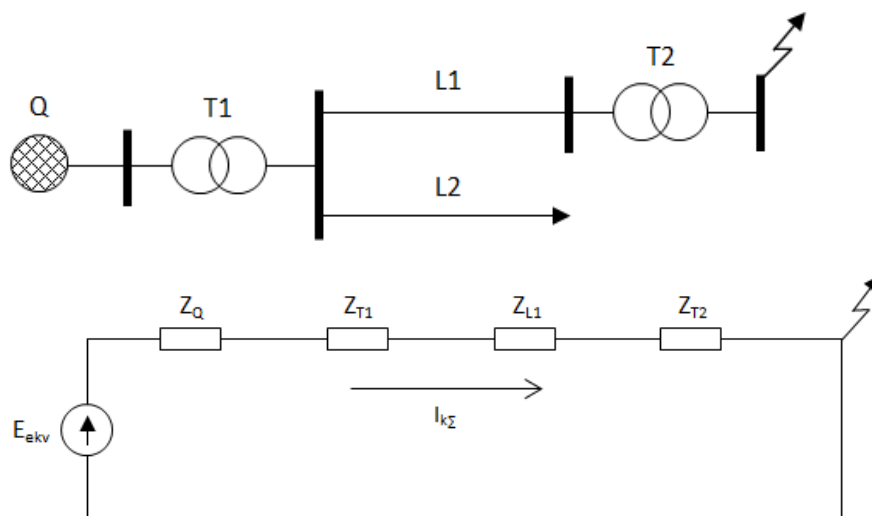
$$E_{Ihi} = \frac{E_{Uhi}}{Z_{hi}}, \quad (3.20)$$

kus  $Z_{hi}$  – liitumispunkti näivtakistuse ja harmooniku järgu korrutis.

## 4. LÜHISVOOLUD JA KAITSE

### 4.1. Lühisvoolude arvutamine

Lühisvoolude leidmisel on aluseks rahvusvaheline standard IEC 60909 [15]. Arvutamiseks koostatakse vaadeldava elektrisüsteemi aseskeem. Käsitlarvutamisel kasutatakse teisendamismeetodit, mille käigus lähteaseskeem teisendatakse ekvivalentsele resulteerivale kujule lühisekoha suhtes [16] (Joonis 5.1).



Joonis 4.1. Elektrivõrgu osa ja selle aseskeem lühisvoolu arvutamisel

Aseskeemi teisendamisel on oluline takistuste taandamine lühisekoha nimipingele valemi 4.1 järgi.

$$z_1 = z_2 \cdot \frac{U_1^2}{U_2^2}, \quad (4.1)$$

kus  $z_1, z_2$  – näivtakistus erinevatel pingetasemetel,

$U_1, U_2$  – erinevad pingetasemed.

Ekvivalentse elektromotoorjõu aluseks võetakse lühisekoha nimipinge  $U_{nF}$ , mida korrigeeritakse pingeteguriga  $c$  vastavalt valemile 4.2.

$$E_{ekv} = c \frac{U_{nF}}{\sqrt{3}} \quad (4.2)$$

Lühisvoolu efektiivväärtus joonisel 4.1 toodud näite korral avaldub valemi 4.3 alusel.

$$I_k = \frac{E_{ekv}}{Z_Q + Z_{T1} + Z_{L1} + Z_{T2}} = \frac{E_{ekv}}{Z_\Sigma}, \quad (4.3)$$

kus  $Z_Q$  – elektrisüsteemi resulteeriv takistus taandatuna lühisekoha nimipingele,  
 $Z_{T1}$  – jõutrafo T1 takistus taandatuna lühisekoha nimipingele,  
 $Z_{L1}$  – liinilõigu L1 takistus taandatuna lühisekoha nimipingele,  
 $Z_{T2}$  - jõutrafo T2 takistus taandatuna lühisekoha nimipingele.

Lühisvoolu suurimat hetkväärtust nimetatakse löökvooluks, mis avaldub vastavalt valemile 4.4.

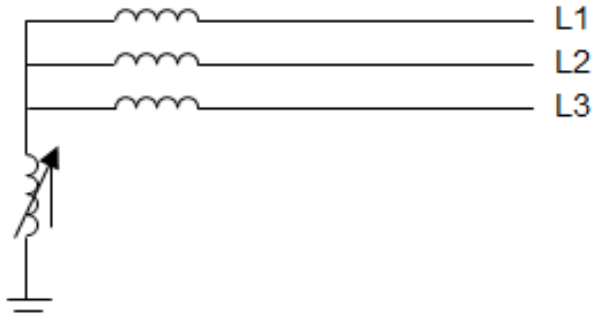
$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k \quad (4.4)$$

kus  $i_p$  – löökvool  
 $\kappa$  – löögitegur ( $\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3R/X}$ )

Seni käsitletud meetodika sobib sümmeetriliste kolmefaasiliste lühiste arvutamiseks. Nende kõrval esinevad aga ka kahefaasilised, ühefaasilised ning kahefaasilised maalühised, mida võib üldistatult nimetada asümmeetrilisteks lühisteks.

Asümmeetrilisi lühisvoole arvutatakse kolmefaasilises süsteemis sümmeetriliste komponentide meetodil. Neid nimetatakse päri-, vastu- ja nulljärgnevuskomponentideks. Kui kolmefaasiliste lühiste arvutamisel kasutatakse ainult pärijärgnevustakistusi, siis asümmeetrilistel lühistel tuleb mõjutavad lühisvoolude suurusi ka vastu- ja nulljärgnevustakistused [16].

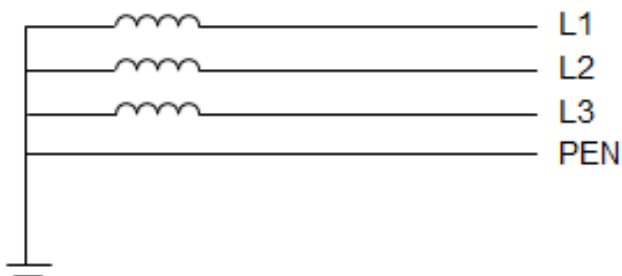
Talitlust asümmeetrilistel lühistel mõjutab oluliselt võrgu neutraali maandamisviis. Keskpingevõrk on Eestis maast isoleeritud või resonantsmaandatud (Joonis 4.2).



Joonis 4.2. Resonantsmaandatud elektrivõrk

Ühefaasilist lühist nendes võrkudes nimetatakse maahenduseks. Isoleeritud võrgu ainsateks maaga ühendatavateks elementideks on trafomähiste ja liinide mahtuvus maa suhtes. Resonantsmaandatud võrgus on maahendusvoolu mahtvuslik komponent kompenseeritud läbi kaarekustutuspooli. Mõlemal neutraali maandamisviisil jääb maahendusvool võrreldes kolme- ja kahefaasilise lühisvooluga väga väikeseks.

Madalpingevõrgu neutraal on jäigalt maandatud (Joonis 4.3) ning ühefaasiline lühisvool on piisavalt suur selle tuvastamiseks liigvoolukaitsega.



Joonis 4.3. Maandatud neutraaliga elektrivõrk

Kahefaasilisel lühisel puudub ühendus maaga ja nulljärgnevusvoolusid ei teki. Lühisvool avaldub vastavalt valemile 4.5.

$$I_{k(2)} = \frac{\sqrt{3} \cdot E_{ekv}}{z_{1\Sigma} + z_{2\Sigma}}, \quad (4.5)$$

kus  $z_{1\Sigma}$  - pärijärgnevustakistus,  
 $z_{2\Sigma}$  - vastujärgnevustakistus.



Päri- ja vastujärgnevustakistused on staatilistel elektrivõrguseadmetel nagu trafod, õhu- ja kaabelliinid võrdsed kuid võivad erineda pöörlevatel masinatel. Generaatori lähedal esinevate lühiste ülimööduva seisundi korral on pärijärgnevustakistused võrdsed vastujärgnevustakistustega ja kahefaasiline lühisvool moodustab kolmefaasilisest  $\sqrt{3}/2 = 0,87$ . Generaatori püsilühisvoolu korral on aga vastujärgnevustakistus pärijärgnevustakistusest palju väiksem ning suhteväärtus võib olla enamalt  $\sqrt{3}/1 = 1,73$  [16].

Ühefaasilist lühisvoolu mõjutavad nii päri-, vastu- kui nulljärgnevustakistused. Lühisvool avaldub vastavalt valemile 4.6.

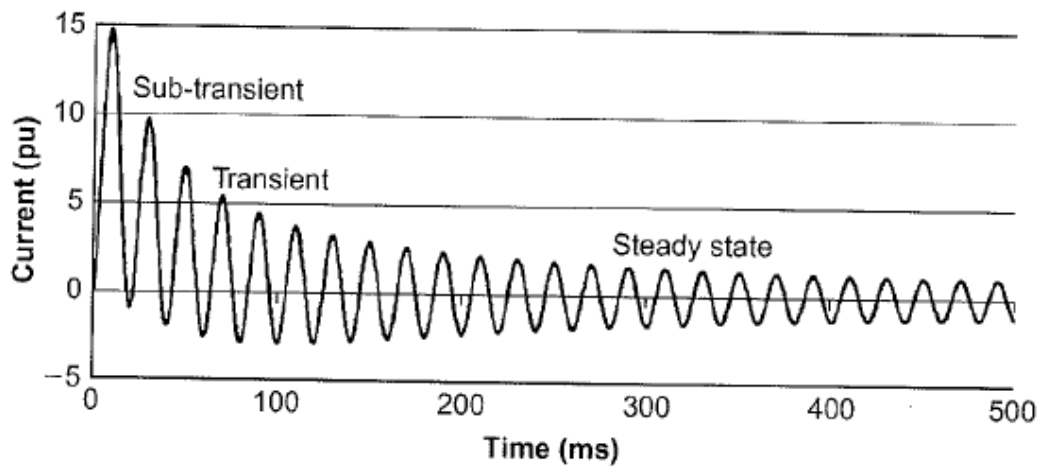
$$I_{k(1)} = \frac{3 \cdot E_{ekv}}{z_{1\Sigma} + z_{2\Sigma} + z_{0\Sigma}}, \quad (4.6)$$

kus  $z_{0\Sigma}$  - nulljärgnevustakistus.

Peamiste elektrivõrgu seadmete nulljärgnevustakistused on päri- ja vastujärgnevustakistustest erinevad. Kõige väiksem on nulljärgnevustakistus generaatori lähedal asuva püsilühise korral ja ühefaasiline lühis võib olla kolmefaasilisest suurem maksimaalselt 3 korda. Lõpmatult suure nulljärgnevustakistuse korral on aga ühefaasilise lühisvoolu väärtus 0 [16].

## 4.2. Tootmisseadmete lühisvoolud

**Sünkroongeneraatori** takistus ja elektromotoorjõud on lühise suhtes tundlikud ning muutuvad siirdeprotsessi käigus. Takistuse muutumise tõttu ei jää generaatoriga ühendatud ahelas lühisvoolu perioodilise komponendi efektiivväärtus  $I_k$  ajas konstantseks vaid muutub siirdeprotsessi käigus ülimööduvast väärtusest  $I''_k$  kuni püsiväärtuseni  $I^\infty_k$  (Joonis 4.4) [16].



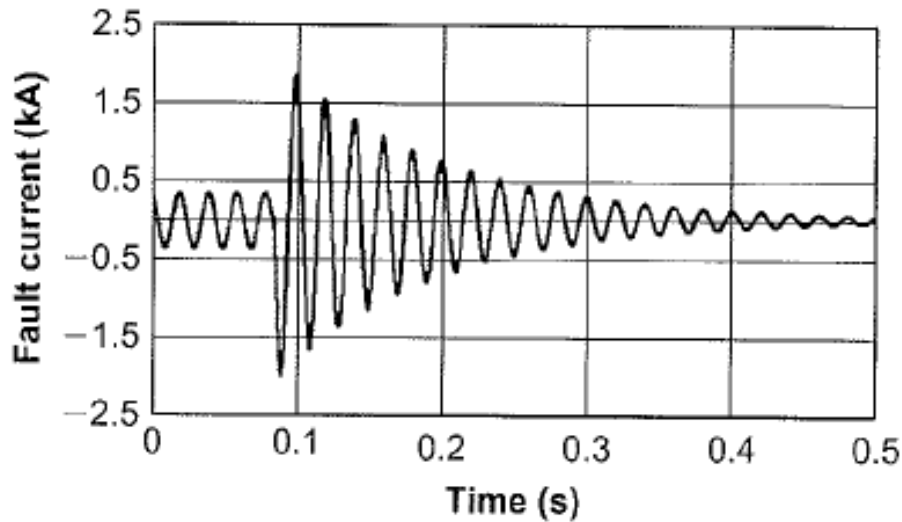
Joonis 4.4. Sünkroongeneraatori lühisvool kolmefaasilisel lühisel

Ülimööduva voolu leidmiseks tuleb lühisvoolude arvutamise askeemi lisada ülimööduva reaktiivtakistuse pikikomponendi  $x''_d$ . Sünkroongeneraatori püsilühisvool leitakse püsilühisvoolutegurite  $\lambda$  abil vastavalt valemile 4.7 [15].

$$I_k^\infty = \lambda I_n, \quad (4.7)$$

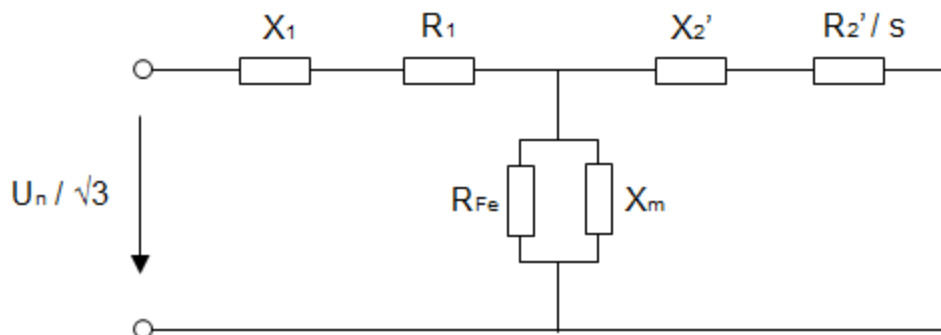
kus  $I_k^\infty$  – generaatoriharu püsilühisvool,  
 $I_n$  – generaatoriharu nimivool.

**Lühisrootoriga asünkroongeneraatori** käitumine lühisel erineb eelnevalt kirjeldatud sünkroongeneraatori omast. Kolmefaasiline lühis ei võimalda asünkroongeneraatoril saada magnetamiseks vajalikku reaktiivvõimsust, mistõttu võrku antav lühisvool kahaneb kiiresti nullini (Joonis 4.5).



Joonis 4.5. Asünkroongeneraatori lühisvool kolmefaasilisel lühisel

Kuna asünkroongeneraator suudab lühisvoolu anda vaid lühikese aja vältel osutub praktikas vajalikuks lühisvoolu leidmine lühise algthetkel. Vastava lühistakistuse leidmiseks vaatleme asünkroongeneraatori askeemi joonisel 4.6.



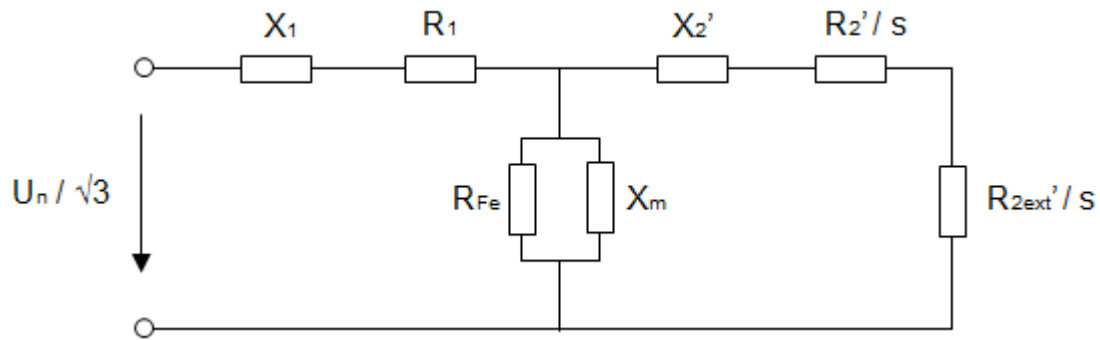
Joonis 4.6. Lühisrootoriga asünkroongeneraatori askeem

Masina vool lühisel on määratud valemitega 4.8 ja 4.9 [6].

$$x_k = x_1 + x_2' \quad (4.8)$$

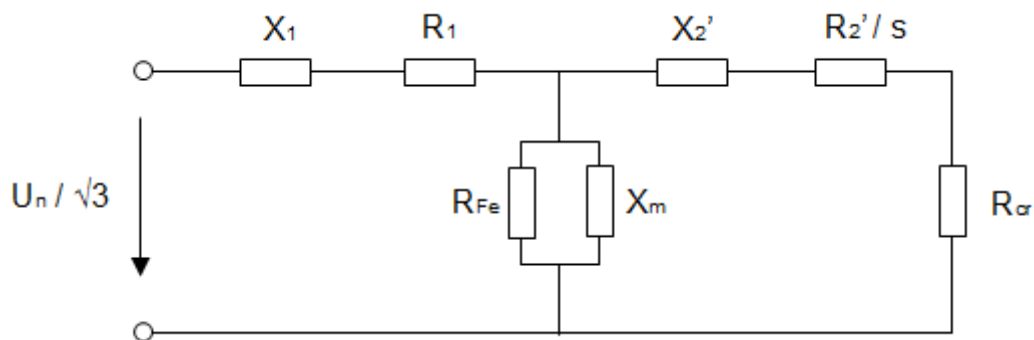
$$r_k = r_1 + r_2' \quad (4.9)$$

**Rootoriahelas oleva takistiga asünkroongeneraatori** askeemi lisatakse täiendav takistus  $R_{2ext}'$  (Joonis 4.7) [17] [18].



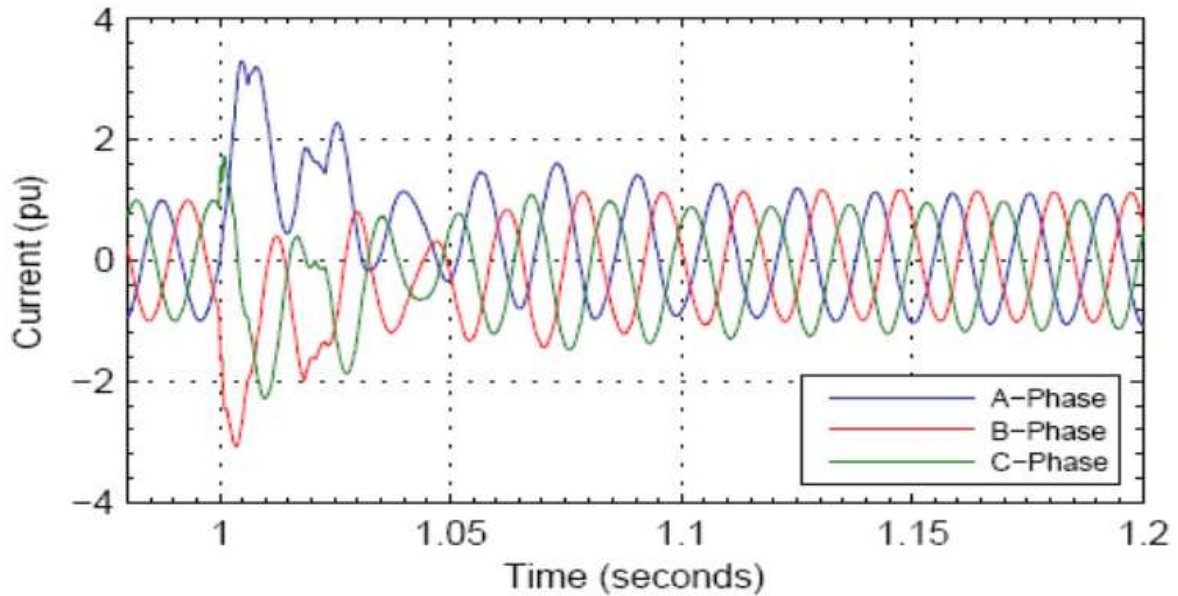
Joonis 4.7. Rootoriahelas oleva takistiga asünkroongeneraatori aseskeem

**Kaksistoitega asünkroongeneraatori** käitumine lühisel sõltub olulisel määral nii konkreetse mudeli ehitusest kui ka lühisekoha kaugusest ja lühisvoolu suuruselt. Suurte lühisvoolude korral indutseeritakse masina rootoris ülepinge, mis muutub ohtlikuks rootoriahelas asuvale jõuelektroonikamuundurile. Sellisel juhul suunatakse vool läbi lühisetõrjeahela  $R_{cr}$  ning generaator käitub sarnaselt lühisrootoriga asünkroongeneraatorile joonisel 4.8 toodud aseskeemi alusel [19].



Joonis 4.8. Kaksistoitega asünkroongeneraatori aseskeem

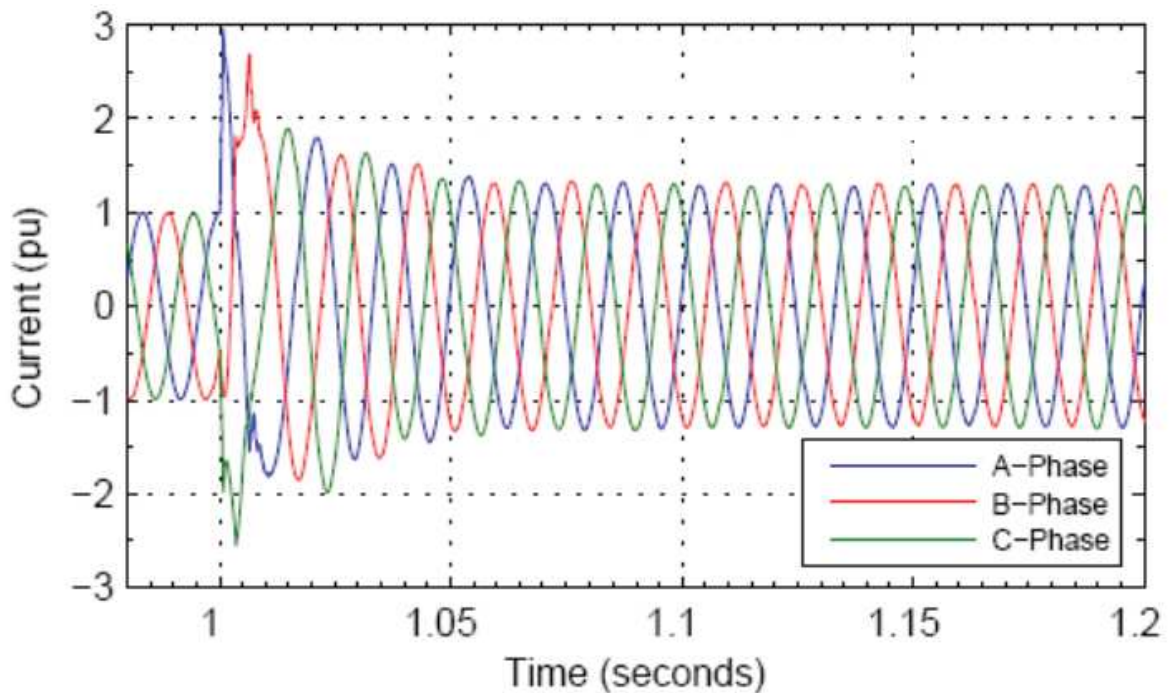
Lühisvoolu alanedes lühisetõrjeahel deaktiveeritakse ning lühisvoolu suuruse määrab muunduri controller. Joonisel 4.9 on toodud näide kaksistoitega asünkroongeneraatori lühisvoolust kus eelnimetatud protsessid selgelt eristuvad [20].



Joonis 4.9. Kaksistoitega asünkroongeneraatori lühisvool kolmefaasilisel lühisel

**Muunduritel** põhinevate tootmiseadmete korral puudub otsene sidetus primaarenergia allika ja elektrivõrgu vahel. Muunduri alalisvoolulüli võimaldab kontrollida väljundvõimsust sõltumata sisendvõimsusest primaarenergiaallika poolt rakendatava sisendpinge ulatuses. See tähendab, et selliste tootmiseadmete käitumine lühisel erineb oluliselt pöörlevatest masinatest.

Lühise alghetkel tekib siirdeprotsessile iseloomulik voolu tõus, mis võib erinevate allikate põhjal ulatuda 2 kuni 3 kordse nimivooluni. Voolu tõus jääb väga lühiajaliseks kuna see piiratakse kiirelt muunduri kontrolleri poolt selleks, et kaitsta jõuelektroonikakomponente. Piirang on sageli seatud nimivoolu lähedale näiteks 1,1 korda suuremaks kuid võib sõltuvalt jahutustingimustest olla ka kõrgem [15] [19] [21] [22]. Joonisel 4.10 on toodud näide läbi muunduri ühendatud tootmiseadme lühisvoolust, kus seade on programmeeritud andma võrku lühisvoolu 1,2 korda nimivoolust [20].



Joonis 4.10. Muunduri lühisvool kolmefaasilisel lühisel

Muundurite käsitlemine lühisvoolude lihtsustatud arvutamisel on sõltuvalt standardiseeritud käsitluse puudumisest raskendatud. Üheks võimaluseks tootmiseseadme lisamisel lühisvoolude arvutamise aseskeemi on lähtuda seadme andmelehel või tüübikatsetuste protokollidel (Joonis 4.11) toodud maksimaalsest lühisvoolu väärtusest vastavalt valemile 4.10 [15].

Fault level contribution	
Short-circuit current at micro-generator terminals	
0.0561 kA	

Joonis 4.11. Väljavõte Danfoss TLX seeria inverterite tüübikatsetuste protokollist [23]

$$z_k = \frac{1}{I_k/I_n} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}, \quad (4.10)$$

- kus  $I_k$  – muunduri suurima lühisvoolu väärtus,  
 $I_n$  – muunduri nimivool,  
 $U_n$  – muunduri nimipinge,  
 $S_n$  – muunduri niminäivvõimsus.

### 4.3. Lühisvoolude nivoo

Kuna elektrienergia tootmiseseadmed on võimelised tõstma võrgus lühisvoolude nivood on liitumisele eelnevalt oluline hinnata nende mõju jaotusvõrgu primaarseadmete dünaamilisele ja termilisele lühisvoolutaluvusele.

Kõige suuremaid dünaamilisi ehk mehaanilisi jõudusid faasijuhtide vahel põhjustavad löökvoolud. Lühiseliikidest on kõige suuremate jõudude tekitajad kolmefaasilised lühised. Ühefaasilistel lühistel on suur vool vaid ühes faasis ja seetõttu jäävad faasidevahelised jõud väiksemaks kui teistel lühistel [16].

Dünaamilise taluvuse hindamiseks võrreldakse löökvoolu seadme normeeritud löökvoolutaluvusega. Vaatluse all olev seade talub lühisvooludest tulenevaid dünaamilisi mõjusid juhul kui tagatud on tingimus 4.11.

$$i_p \leq i_{pn}, \quad (4.11)$$

kus  $i_p$  – löökvool,  
 $i_{pn}$  – seadme normeeritud löökvoolutaluvus.

Lisaks mehhaanilistele jõududele kuumendavad lühisvoolud elektrijuhte märgatavalt. Lühise põhjustatud juhtide kuumenemine sõltub juhi materjalist ja mõõtmetest ning lühisvoolu suurusest ja lühise kestusest. Termilise taluvuse kontrollimiseks kasutatakse lühisvoolu termiliselt ekvivalentset efektiivväärtust ehk termoekvivalentset lühisvoolu. See leitakse ülimööduva lühisvoolu  $I''_k$  järgi valemiga 4.12 [16].

$$I_{th} = I''_k \sqrt{m + n}, \quad (4.12)$$

kus  $m$  – aperiodilise voolukomponendi termilist mõju arvestav tegur,  
 $n$  – periodilise voolukomponendi termilist mõju arvestav tegur,  
 $I_{th}$  – termoekvivalentne lühisvool.

Tegurid  $m$  ja  $n$  määratakse graafiliselt. Lühise kestuse  $t_k$  määrab selle katkestamise kiirus. Juhul kui see on võrdne või väiksem kui seadme normeeritud lühiseaeg  $t_n$  on termiline taluvus tagatud tingimusel 4.13 [16].

$$I_{th} \leq I_{thn}, \quad (4.13)$$

kus  $I_{thn}$  – seadme normeeritud termiline lühisvoolutaluvus.

Juhul kui lühise kestus ületab seadme normeeritud lühiseaega on termiline taluvus tagatud tingimusel 4.14.

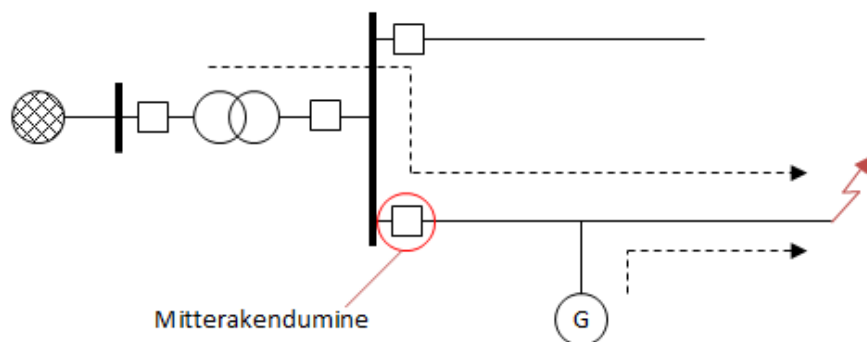
$$I_{th} \leq I_{thn} \sqrt{\frac{t_n}{t_k}}, \text{ kui } t_k > t_n \quad (4.14)$$

#### 4.4. Kaitserakendumine

Elektrienergia tootmiseadmete võime toita võrku lühisvooluga võib avaldada olulist mõju olemasolevatele jaotusvõrgu kaitseseadmetele ning põhjustada nende mittetöötamist või liigrakendumist [24] [25]. Vajalik on hinnata kas tootmiseadmete liitumisele järgnevalt on tagatud kaitseseadmete normaalne toimimine. Vajadusel tuleb muuta olemasolevat kaitsekonfiguratsiooni või kaitsete rakendumisparameetreid.

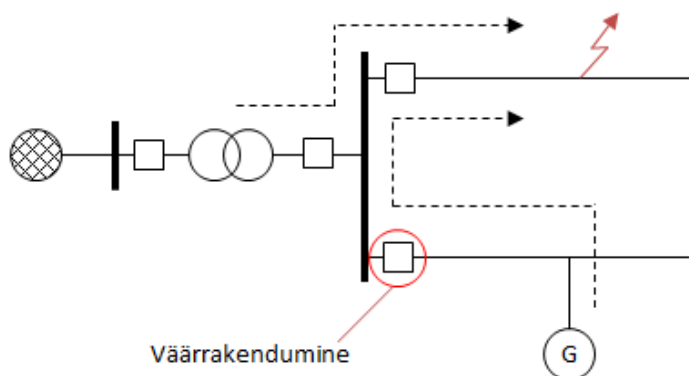
Vaatleme olukorda kus kesk- või madalpingefiidrile on ühendatud elektrienergia tootmiseseade ning lühis esineb sama fiidri kaugemas osas (Joonis 4.12). Tootmiseseadme poolt võrku antav lühisvool vähendab lühisvoolu toitevõrgu poolt, mistõttu fiidri- või muu kaitse, mis asub tootmiseseadmest toitealajaama pool ei pruugi rakenduda.





Joonis 4.12. Kaitse mitterakendumine

Kaitse liigrakendumise võimaluse selgitamiseks vaatleme olukorda kus tootmiseseade on ühendatud madal- või keskpinge fiidril ning lühis esineb kõrvalasuval fiidril. Tootmiseseadme poolt võrku antav lühisvool võib ületada fiidri- või sektsioneeriva kaitse rakendumisväärtust, mis põhjustab mitterikkelise fiidri või selle osa eraldamise jättes sellel paiknevad tarbijad tooteta (Joonis 4.13).



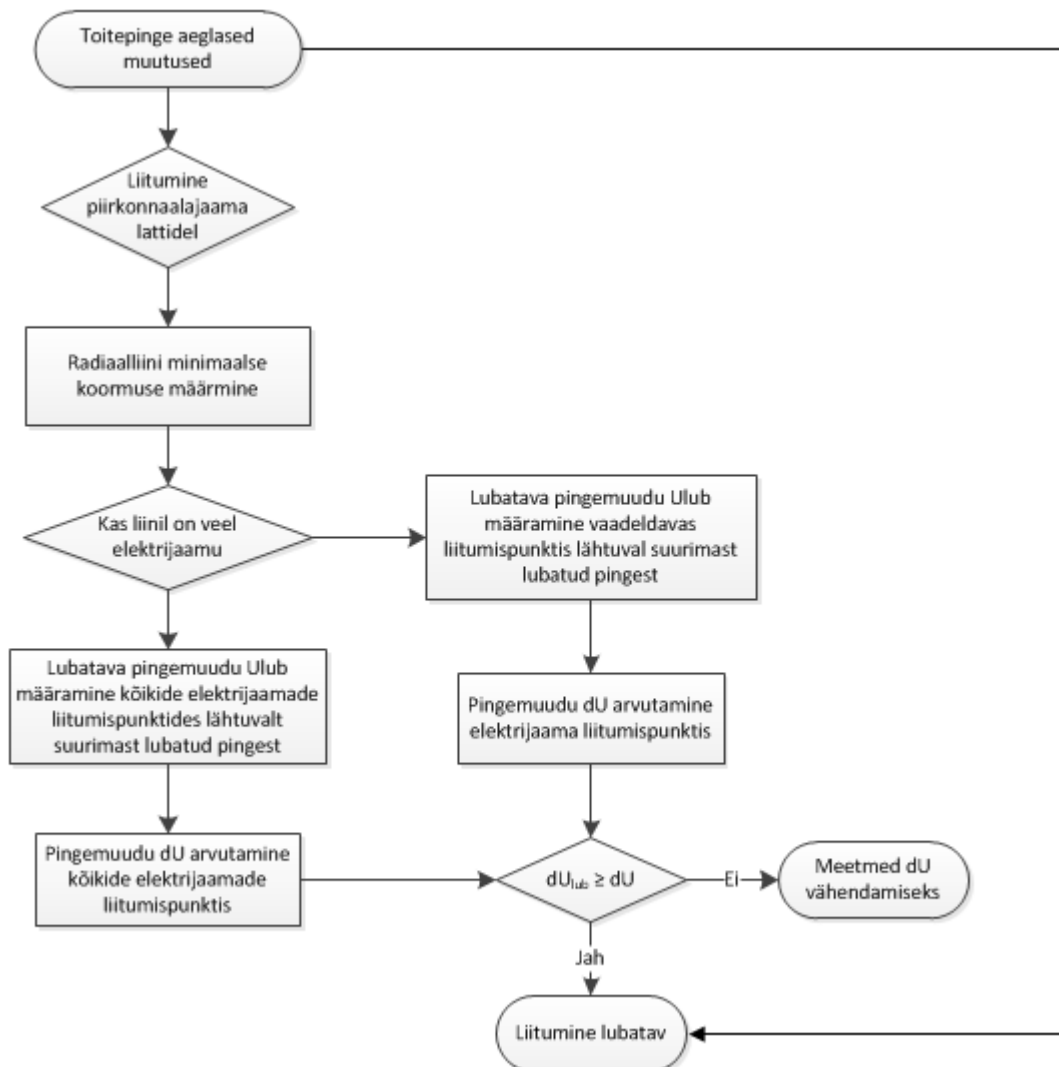
Joonis 4.13. Kaitse liigrakendumine

Lisaks eeltoodud juhtumitele võib esineda vastuolu veel ühe levinud praktikaga. Kõige suuremad lühisvoolud esinevad jaotusvõrgus piirkonnaalajaamade keskpinge jaotusseadme lattidel mistõttu on lühise viivitamatu tuvastamine ja eraldamine kriitiline. Sama oluline on tagada, et jaotusseadme kaitse ei rakenduks lühistelemujal keskpingevõrgus. Selektiivsust alajaamast väljuvate fiidrite kaitseseadmete suhtes tagatakse tingimusega, et väljuvate fiidrite liigvoolukaitsete käivitumisel jaotusseadme kaitse blokeeritakse. Traditsiooniliselt kasutatakse fiidrikaitsetena suunamata liigvoolukaitseid, mis tähendab, et juhul kui lühis piirkonnaalajaama lattidel toidavad ka vastavas keskpingevõrgus paiknevad



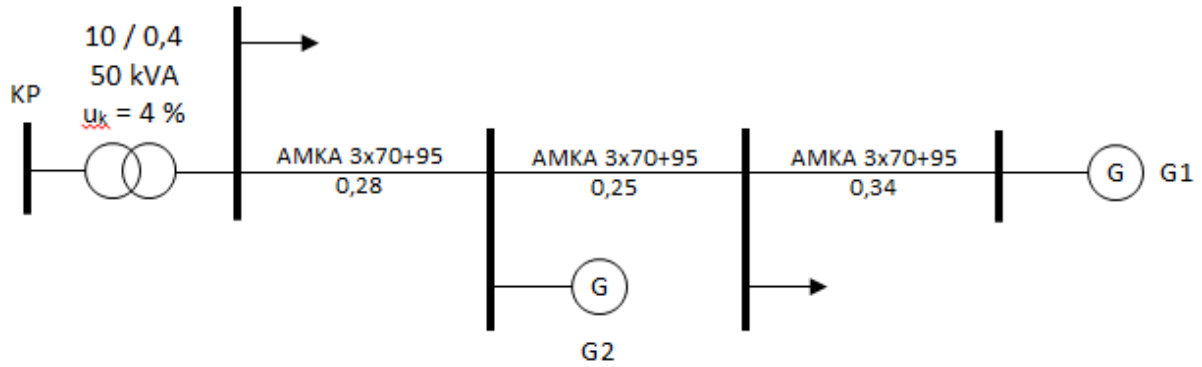
## 5. LAHENDUSALGORITMID JA ARVUTUSNÄITED

### 5.1. Toitepinge aeglased muutused



Joonis 5.1. Toitepinge aeglase muutuse hindamisalgoritm

**Näide 5.1.** Madalpingeliinile liituva elektritootmiseadme püsitalitlusest põhjustatud pingemuudu hindamine. Maksimaalne pinge KP/MP alajaama keskpinge poolel loetakse teadaolevaks. Liini lõpus asub olemasolev elektritootja (joonis 5.2).



Joonis 5.2. Madalpingeüidri põhimõtteskeem

Lähteandmed:

$$U_{maxKP} = 10,28 \text{ kV}$$

$$P_{lubG1} = 10 \text{ kW}$$

$$\cos\varphi_{G1} = 1$$

$$P_{lubG2} = 13 \text{ kW}$$

$$\cos\varphi_{G2} = 1$$

Takistused:

	R, $\Omega$	X, $\Omega$
AMKA 3x70+95	0,479 $\Omega$ /km	0,097 $\Omega$ /km
Jõutrafo	0,0089	0,0107
Keskpingevõrk (taandatud 0,4 kV-le)	0,0013	0,0027

Suhtelise pingemuutuse leidmine olemasoleva elektriijaama liitumispunktis ilma uue elektriijaamata:

$$\Delta U_{G1(1)} = \frac{PR + QX}{U_n} = \frac{10000 \cdot (0,479 \cdot 0,87 + 0,0089 + 0,0013)}{400} = 10,67 \text{ V}$$

$$dU_{G1(1)} = \frac{\Delta U}{U_n} = \frac{10,67}{400} = 2,67 \%$$

Suhtelise pingemuutuste leidmine uue elektriijaama liitumisel selle liitumispunktis:

$$\Delta U_{G2(2)} = \frac{13000 \cdot (0,479 \cdot 0,28 + 0,0089 + 0,0013)}{400} = 4,69 \text{ V}$$

$$dU_{G2(2)} = \frac{4,69}{400} = 1,17 \%$$

Liitva elektriijaama poolt põhjustatav resulteeriv suhteline pingetõus olemasoleva elektriijaama liitumispunktis:

$$dU_{G1(2)} = dU_{G1(1)} + dU_{G2(2)} = 2,67 + 1,17 = 3,84 \%$$

Suurima talitluspinge määramine minimaalsel koormusel trafo ülekandesuhte abil:

$$U_{max} = \frac{10,28}{\left(\frac{10}{0,4}\right)} = 411,2 \text{ V}$$

Suurim võimalik pingetase olemasoleva elektriijaama liitumispunktis:

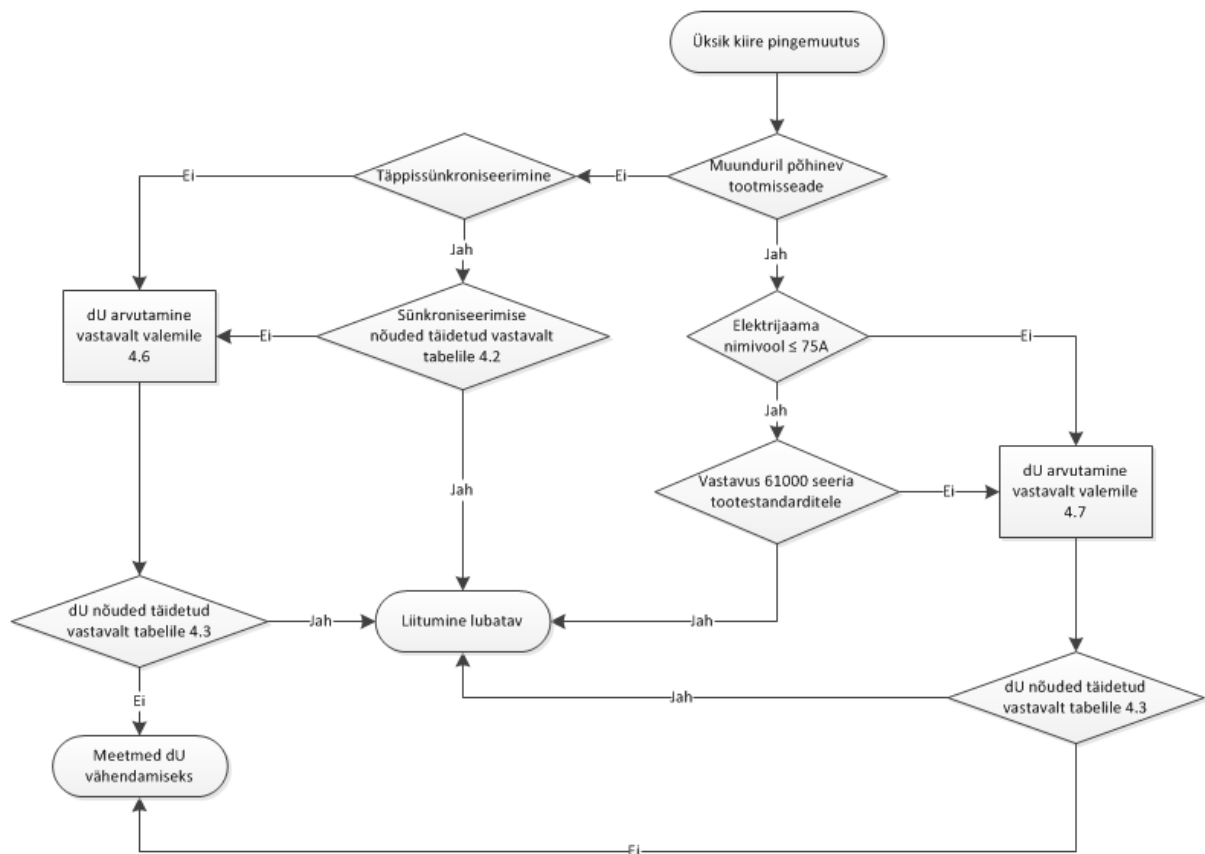
$$U_{max} = 411,2 + 3,84 \% = 427 \text{ V}$$

Tulemus:

Liituv elektriijaam ei põhjusta kõige halvemal juhtumil pingetõusu üle lubatava piirnormi  $U_n$  +10% kogu fiidri ulatuses.

## 5.2. Üksik kiire pingemuutus

Lahendusalgoritm (Joonis 5.3) elektrienergia tootmiseseadmete poolt põhjustatud kiirete pingemuutuste hindamiseks põhineb peatükis 3.2 toodud analüüsil ning võtab kokku selles toodud viited ja nõuded. Muunduritel põhinevate tootmiseseadmete korral lähtutakse hinnangu andmisel tootestandarditest ja pingemuutusteguritest. Pöörlevate masinate kasutamisel sõltub kontrollimeetod sünkroniseerimise viisist. Lähtuvalt lülitustoimingute tihedusest määratakse piirmäär suhtelisele pingemuutusele ja kontrollitakse selle täitmist.



Joonis 5.3. Kiirete pingemuutuste hindamisalgoritm

**Näide 5.2.** Soojuselektriijaamas kasutatava lühisrootoriga asünkroongeneraatori võrku lülitamisest põhjustatud pingemuutuse leidmine ja hindamine.

Lähteandmed:

$$P_n = 2300 \text{ kW}$$

$$\cos\varphi = 0,88$$

$$k_{imax} = 1,2 \text{ (piiratud käivitustakistiga)}$$

$$U_n = 10000 \text{ V}$$

$$R = 1,033 \ \Omega$$

$$X = 2,301 \ \Omega$$

Kiire pingemuutuse arvutuslik leidmine:

$$S_n = \frac{P_n}{\cos\varphi} = \frac{2300}{0,88} = 2613,636 \text{ kVA}$$

$$\varphi = -23,358^\circ$$

$$\psi = \arctan\left(\frac{X}{R}\right) = 65,818^\circ$$

$$S_k = \frac{U_n^2}{Z} = \frac{10000^2}{\sqrt{1,033^2 + 2,301^2}} = 39647,312 \text{ kVA}$$

$$dU = k_{imax} \frac{S_n}{S_k} \cos(\varphi + \psi) = 1,2 \cdot \frac{2613,636}{39647,312} \cos(42,46^\circ) = 5,84 \%$$

Tulemus:

Tootmiseadme võrku lülitamisest põhjustatud suhteline pingemuutus on 5,84 %. Pingemuutus on lubatav tingimusel, et lülitamistoiminguid ei tehta tihemini kui 4 korda ööpäevas.

**Näide 5.3.** Elektrituuliku lülitustoimingutest põhjustatud suurima võimaliku pingemuutuse leidmine ja hindamine.

Lähteandmed:

$$P_n = 2300 \text{ kVA}$$

$$\cos\varphi = 1$$

$$U_n = 10000 \text{ V}$$

$$R = 0,486 \ \Omega$$

$$X = 2,157 \ \Omega$$

$$\psi = \arctan\left(\frac{X}{R}\right) = 77,302^\circ$$

$k_u \psi_k$  väärtused elektrituuliku tüübikatsete protokollis

Network impedance phase angle, $\Psi_k$ (deg.)	30	50	70	85
Flicker step factor, $K_f$ ( $\Psi_k$ )	0,6	0,6	0,6	0,6
Voltage change factor, $K_u$ ( $\Psi_k$ )	1,0	1,2	1,3	1,3

Kiire pingemuutuse arvutuslik leidmine:

$$S_n = \frac{P_n}{\cos\varphi} = 2300 \text{ kVA}$$

$$\varphi = 0^\circ$$

$$S_k = \frac{U_n^2}{Z} = \frac{10000^2}{\sqrt{0,486^2 + 2,157^2}} = 45226,905 \text{ kVA}$$

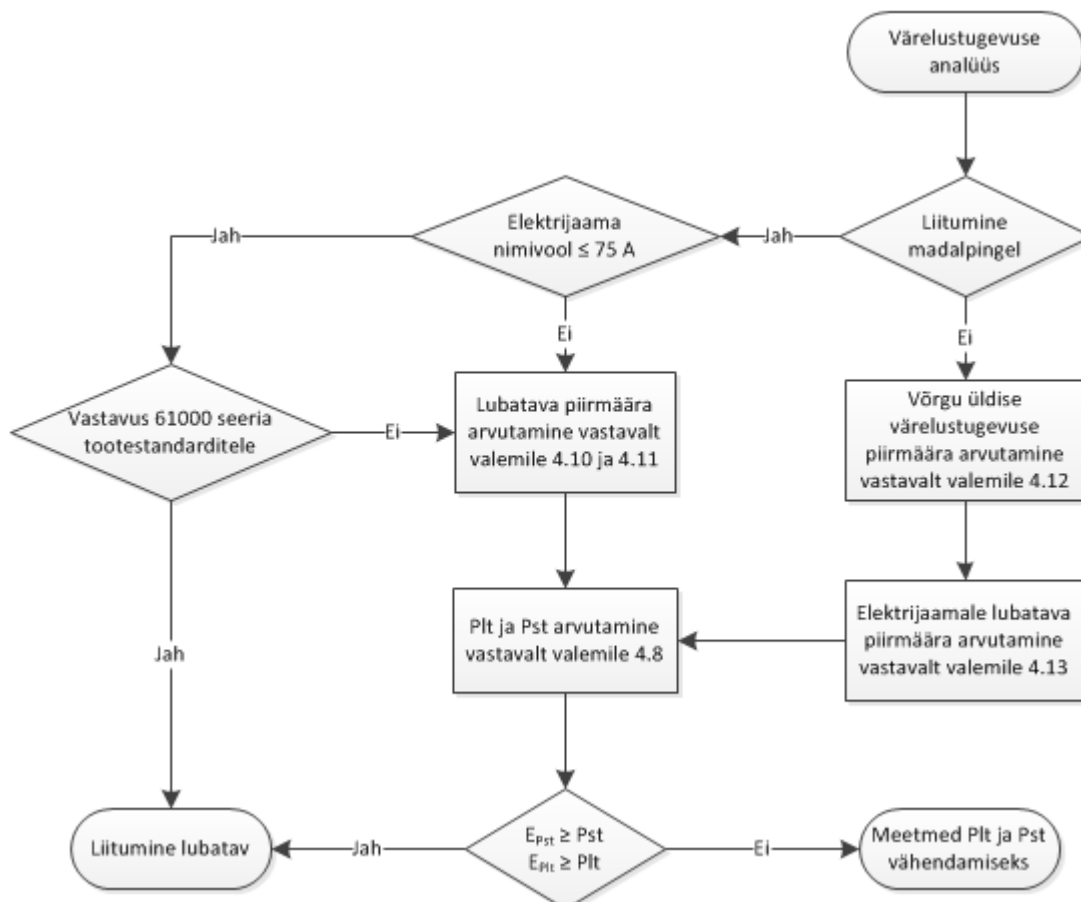
$$dU = k_u(\psi_k) \cdot \frac{S_n}{S_k} = 1,3 \cdot \frac{2300}{45226,905} = 6,6 \%$$

Tulemus:

Elektrituuliku lülitamistoimingutest põhjustatud suurim võimalik pingemuutus ületab lubatud väärtusi. Liitumiseks tuleb suurendada võrgu läbilaskevõimet või kasutada väiksemate pingemuutusteguritega elektrituulikut.

### 5.3. Värelustugevus

Lahendusalgoritm (Joonis 5.4) elektrienergia tootmiseadmete püsitalitlusest põhjustatud värelustugevuse hindamiseks põhineb peatükis 3.3 toodud analüüsil ja selles esitatud arvutusmetoodikatel. Liitumisel madalpingevõrguga lähtutakse tootestandarditest või nende puudumisel soovitud tootmisvõimsuse ja võrguosa toitva jõutrafo võimsuse suhtest. Keskpingevõrgus määratakse värelustugevuse emissiooni piirväärtus lähtuvalt erineva pingetasemega võrkudele määratud soovituslikest normidest.



Joonis 5.4. Värelustugevuse hindamisalgoritm



**Näide 5.4.** Kolmest elektrituulikust koosneva tuulepargi poolt põhjustatud värelustugevuse arvutamine ja liitumise lubatavuse hindamine.

Lähteandmed:

$$S_{TR} = 16 \text{ MVA}$$

$$P_n = 660 \text{ kW}$$

$$\cos\varphi = 1$$

$$R = 0,486 \ \Omega$$

$$X = 2,157 \ \Omega$$

$$U_n = 10000 \text{ V}$$

$$\psi = \arctan\left(\frac{X}{R}\right) = 77,302^\circ$$

$c(\psi_k)$  väärtused elektrituuliku tüübikatsetuste protokollis

Grid impedance angle ( $\psi_k$ )	30°	50°	70°	85°
$c(\psi_k), v_a = 6.0 \text{ m/s}$	8	9	10	10
$c(\psi_k), v_a = 7.5 \text{ m/s}$	9	10	10	10
$c(\psi_k), v_a = 8.5 \text{ m/s}$	10	10	10	11
$c(\psi_k), v_a = 10.0 \text{ m/s}$	10	10	11	11

Keskmise tuulekiiruse kohta andmed puuduvad, mistõttu tuleb värelusteguri väärtuseks valida 11.

Lubatud pika- ja lühiajalise värelustugevuse üldise piirnõrmi leidmine vaadeldavale keskpinge võrgule:

$$L_{PstMV} = 0,9 \text{ (IEC soovitus)}$$

$$L_{PltMV} = 0,7 \text{ (IEC soovitus)}$$

$$L_{PstUS} = 0,8 \text{ (IEC soovitus)}$$

$$L_{PstUS} = 0,6 \text{ (IEC soovitus)}$$

$$T_{PstUS} = 1 \text{ (kõige halvem juhtum täpsemate andmete puudumisel)}$$

$$G_{PstMV} = \sqrt[3]{L_{PstMV}^3 - T_{PstUS}^3 \cdot L_{PstUS}^3} = \sqrt[3]{0,9^3 - 1^3 \cdot 0,8^3} = 0,6$$

$$G_{PltMV} = \sqrt[3]{L_{PstMV}^3 - T_{PstUS}^3 \cdot L_{PstUS}^3} = \sqrt[3]{0,7^3 - 1^3 \cdot 0,6^3} = 0,5$$

Värelustugevuse emissiooni piirnormi määramine liituvale tuuleelektrijaamale:

$$E_{Pst} = G_{PstMV} \cdot \sqrt[3]{\frac{S_n}{S_{TR}}} = 0,6 \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 0,660}{16}} = 0,3$$

$$E_{Plt} = G_{PltMV} \cdot \sqrt[3]{\frac{S_n}{S_{TR}}} = 0,5 \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 0,660}{16}} = 0,25$$

Elektrituuliku poolt põhjustatud värelustugevuse arvutamine:

$$S_k = \frac{U_n^2}{Z} = \frac{10000^2}{\sqrt{0,486^2 + 2,157^2}} = 45226,905 \text{ kVA}$$

$$P_{st} = P_{lt} = c(\psi_k) \cdot \frac{S_n}{S_k} = 11 \cdot \frac{660}{45226,905} = 0,16$$

Kuna tuuleelektrijaam koosneb kolmest ühetaolisest elektrituulikust tuleb leida summaarne värelustugevuse emissioon:

$$P_{st\Sigma} = P_{lt\Sigma} = \frac{1}{S_k} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{wt}} (c_i(\psi_k, v_a) \cdot S_{n,i})^2} = \frac{1}{45226,905} \cdot \sqrt{0,16^2 + 0,16^2 + 0,16^2}$$

$$= 0,277$$

Tulemus:

Tuuleelektrijaama püsitalitlusest põhjustatud pika- ja lühiajaline värelustugevus on kõige halvemal juhtumil 0,277. Saadud tulemus ületab antud liitujale lubatavat pikaajalise värelustugevuse emissiooni piirväärtust. Liitumiseks tuleb suurendada võrgu läbilaskevõimet või kasutada väiksema värelustugevuse emissiooniga elektrituulikuid.

**Näide 5.5.** Päikeseelektrijaama liitumisest põhjustatud värelustugevuse arvutamine ja hindamine. Alalispinge vaheldamiseks on elektrijaamas kasutusel kaks ühesuguste parameetritega muundurit.

Lähteandmed:

$$S_{TR} = 630 \text{ kVA}$$

$$S_n = 49,9 \text{ kVA}$$

$$\cos\varphi = 1$$

$$R = 0,00455 \ \Omega$$

$$X = 0,0168 \ \Omega$$

$$U_n = 400 \text{ V}$$

$$\psi = \arctan\left(\frac{X}{R}\right) = 8,979^\circ$$

$c(\psi_k)$  väärtus tüübikatsetuste protokollis

<b>Flicker</b> (tested according to VDE 0124-100 point 5.1.3)	
Line impedance angle $\psi_k$ :	32°
System flicker coefficient $c_{\psi}$ :	7,23

Tüübikatsetuste protokollis on värelusteguri väärtus toodud ainult võrguimpedantsi faasinurgale 32°. Võtame selle aluseks värelustugevuse arvutamisel.

Värelustugevuse emissiooni piirnormide määramine liituvale päikeseelektrijaamale:

$$E_{Pst} = \sqrt[3]{\frac{S_n}{S_{TR}}} = \sqrt[3]{\frac{99,8}{630}} = 0,54$$

$$E_{Plt} = 0,65 \cdot E_{Pst} = 0,35$$

Ühe tootmiseseadme poolt põhjustatud värelustugevuse leidmine:

$$S_k = \frac{U_n^2}{Z} = \frac{400^2}{\sqrt{0,00455^2 + 0,0168^2}} = 9192,632 \text{ kVA}$$

$$P_{st} = P_{lt} = c(\psi_k) \cdot \frac{S_n}{S_k} = 7,23 \cdot \frac{49,9}{9192,632} = 0,039$$

Elektrijaama summaarse värelustugevuse emissiooni leidmine:

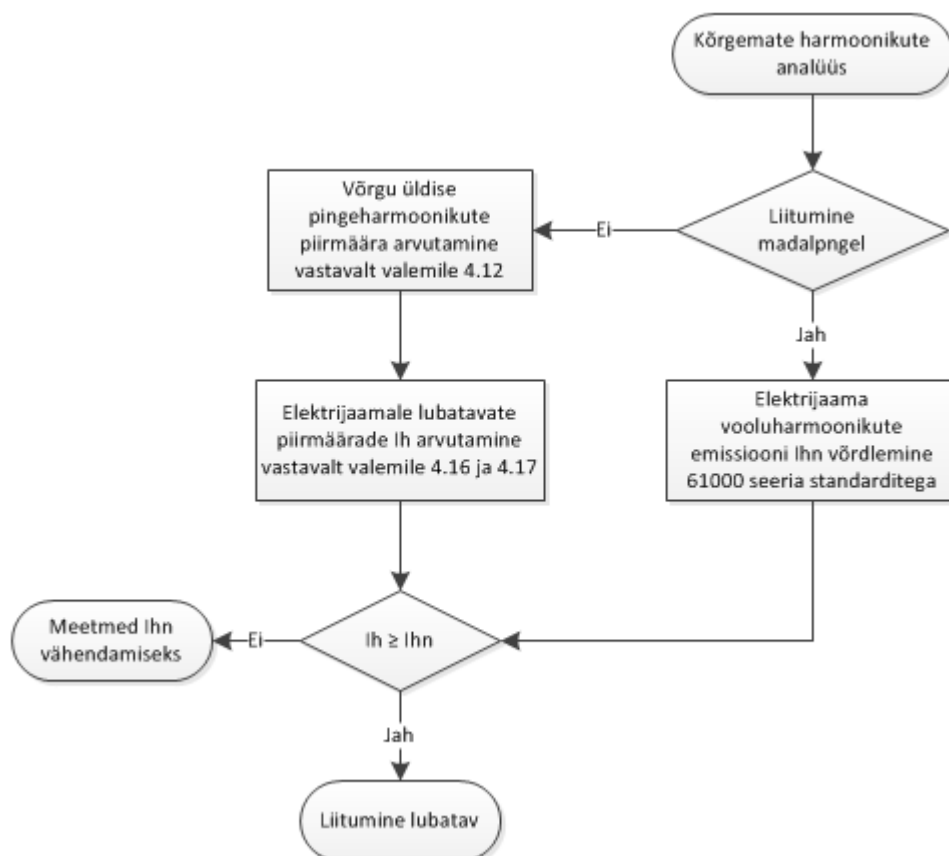
$$P_{st\Sigma} = P_{lt\Sigma} = \frac{1}{S_k} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{wt}} (c_i(\psi_k, v_a) \cdot S_{n,i})^2} = \frac{1}{9192,632} \cdot \sqrt{0,039^2 + 0,039^2} = 0,055$$

Tulemus:

Päikeseelektrijaama tööst põhjustatud pika- ja lühiajaline värelustugevus võib ulatuda väärtuseni 0,055. See jääb oluliselt väiksemaks kui etteseadud piirmäär, mistõttu ei põhjusta elektrijaama liitumine probleeme üldistes värelustasemetes.

## 5.4. Kõrgemad harmoonikud

Lahendusalgoritm (Joonis 5.5) elektrienergia tootmiseadmete kõrgemate harmoonikute emissiooniga seotud mõjude hindamiseks on koostatud peatükis 3.4 toodud põhimõtete alusel. Hindamismetoodika on erinev sõltuvalt liitumispingest. Madalpingel saab lähtuda tootestandarditest ning IEC soovitustega etteantud piirmääradest. Keskpingel tuleb esmalt leida võrguosale lubatavad üldised pingeharmonikute väärtused ning nende alusel määrata liitujale lubatav vooluharmonikute emissiooni piirnorm.



Joonis 5.5. Kõrgemate harmoonikute hindamisalgoritm

**Näide 5.6.** Läbi jõuelektroonikamuunduri ühendatud elektrituuliku kõrgemate harmoonikute emissiooni hindamine.

Lähteandmed:

$$S_{TR} = 32 \text{ MVA}$$

$$S_i = 2,3 \text{ MVA}$$

$$\cos\varphi = 1$$

$$U_n = 6000 \text{ V}$$

$$U_{nUS} = 110000 \text{ V}$$

$$R = 0,049 \ \Omega$$

$$X = 0,312 \ \Omega$$

$$Z = \sqrt{0,049^2 + 0,312^2} = 0,316 \ \Omega$$

Lubatud pingeharmonike taseme leidmine vaadeldavale keskpingevõrgule (arvutused tuuakse ära 2. harmooniku järgu juures, ülejäänud tulemused esitatakse tabelis):

$$G_{h2MV} = \sqrt{L_{h2MV}^\alpha - L_{h2US}^\alpha} = \sqrt{1,8^1 - 1,4^1} = 0,4 \%$$

$$E_{Uh2} = G_{h2MV} \cdot \alpha \frac{S_i}{\sqrt{S_{TR}}} = 0,4 \cdot \sqrt{\frac{2,3}{32}} = 0,029 \%$$

$$0,029 \% \cdot U_n = 1,74 \text{ V}$$

$$E_{Ih2} = \frac{E_{Uh2}}{Z_{h2}} = \frac{1,74}{2 \cdot 0,316} = 2,729 \text{ A}$$

Tootmiseseadme tüübikatsetuste protokollis toodud voluharmoniku emissioon:

$$I_{h2} = 0,12 \%$$

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = 221,3 \text{ A}$$

$$I_{h2} = 0,12 \% \cdot 221,3 = 0,266 \text{ A}$$

Arvutustulemuste alusel koostatud tabel:

Harmoniku järk, $h_i$	$L_{hMV}, \%$	$L_{hUS}, \%$	$G_{hMV}, \%$	$E_{Uhi}, \%$	$E_{Uhi}, \text{ V}$	$E_{Ihi}, \text{ A}$	$E_{Ihi},$ (tootmiseseade) A
2	1,8	1,4	0,400	0,029	1,725	<b>5,459</b>	<b>0,266</b>
3	4	2	2,000	0,144	8,625	<b>9,098</b>	<b>0,199</b>
4	1	0,8	0,200	0,014	0,863	<b>0,682</b>	<b>0,199</b>
5	5	2	3,965	0,099	5,965	<b>3,775</b>	<b>0,730</b>

6	0,5	0,4	0,195	0,005	0,294	<b>0,155</b>	<b>0,133</b>
7	4	2	2,846	0,071	4,282	<b>1,936</b>	<b>0,332</b>
8	0,5	0,4	0,195	0,005	0,294	<b>0,116</b>	<b>0,133</b>
9	1,2	1	0,414	0,010	0,623	<b>0,219</b>	<b>0,221</b>
10	0,47	0,35	0,217	0,005	0,326	<b>0,103</b>	<b>0,177</b>
11	3	1,5	2,598	0,013	0,805	<b>0,232</b>	<b>0,753</b>
12	0,43	0,32	0,287	0,001	0,089	<b>0,023</b>	<b>0,243</b>
13	2,5	1,5	2,000	0,010	0,620	<b>0,151</b>	<b>0,730</b>
14	0,4	0,3	0,265	0,001	0,082	<b>0,019</b>	<b>0,310</b>
15	0,3	0,3	0,000	0,000	0,000	<b>0,000</b>	<b>0,376</b>
16	0,38	0,28	0,257	0,001	0,080	<b>0,016</b>	<b>0,266</b>
17	1,7	1,2	1,204	0,006	0,373	<b>0,069</b>	<b>0,443</b>
18	0,36	0,27	0,238	0,001	0,074	<b>0,013</b>	<b>0,199</b>
19	1,5	1,07	1,051	0,005	0,326	<b>0,054</b>	<b>0,243</b>
20	0,35	0,26	0,234	0,001	0,073	<b>0,011</b>	<b>0,155</b>
21	0,2	0,2	0,000	0,000	0,000	<b>0,000</b>	<b>0,155</b>
22	0,33	0,25	0,215	0,001	0,067	<b>0,010</b>	<b>0,133</b>
23	1,2	0,89	0,805	0,004	0,249	<b>0,034</b>	<b>0,266</b>
24	0,32	0,24	0,212	0,001	0,066	<b>0,009</b>	<b>0,111</b>
25	1,09	0,82	0,718	0,004	0,223	<b>0,028</b>	<b>0,177</b>

Arvutustulemused näitavad, et kõrgemate harmooniku järkude juures jääb tootmiseseadmete emissioon oluliselt väiksemaks piirmääradest. Madalamate järkude juures esineb aga lubatud väärtuste ületamist. Probleemi ülevaatlikkuse hindamiseks võrdleme lisaks nõudlusmoonutustegureid:

$$TDD \text{ (piirmäär)} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_{max}} = 5,18 \%$$

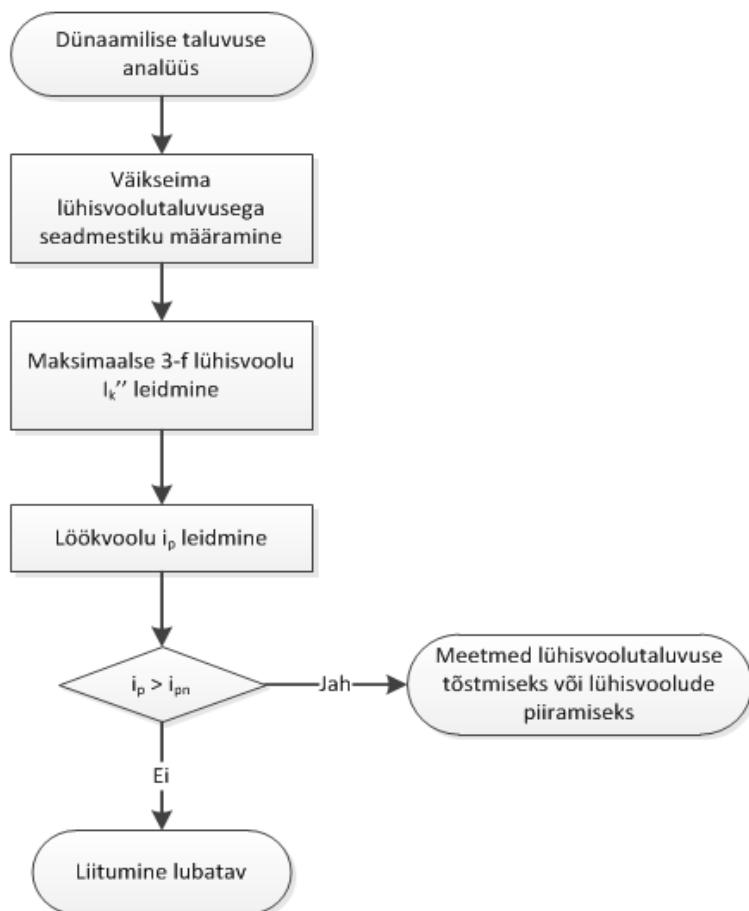
$$TDD \text{ (tootmiseseade)} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_{max}} = 0,76 \%$$

Tulemus:

Elektrituuliku poolt emiteeritavad vooluharmonikud ületavad kõrgemate järkude juures lubatavaid piirväärtusi kuid üldist seisundit ilmestav voolu nõudlusmoonutustegur jääb lubatavast väärtusest oluliselt väiksemaks.

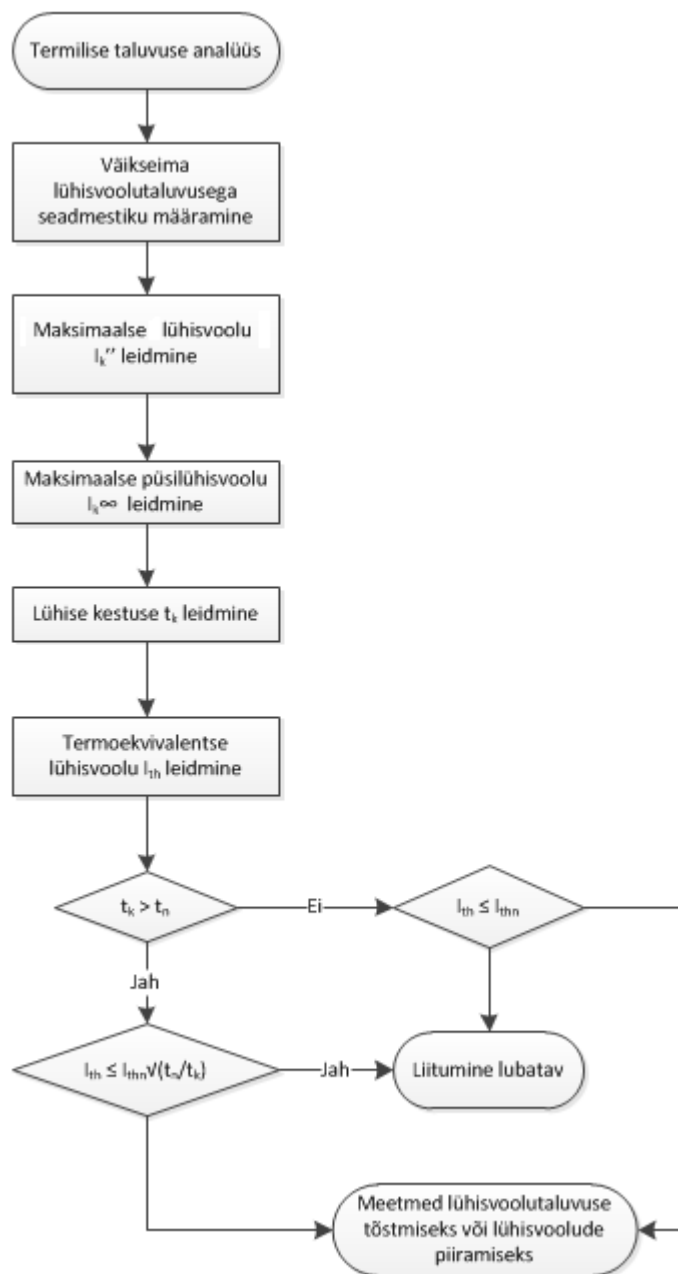
## 5.5. Seadmete dünaamiline ja termiline taluvus

Jaotusvõrgu primaarseadmete dünaamilise taluvuse hindamisel lähtutakse maksimaalsest 3-faasilisest lühisvoolust ning selle suurimast hetkväärtusest ehk löökvoolust (Joonis 5.6).



Joonis 5.6. Dünaamilise taluvuse hindamisalgoritm

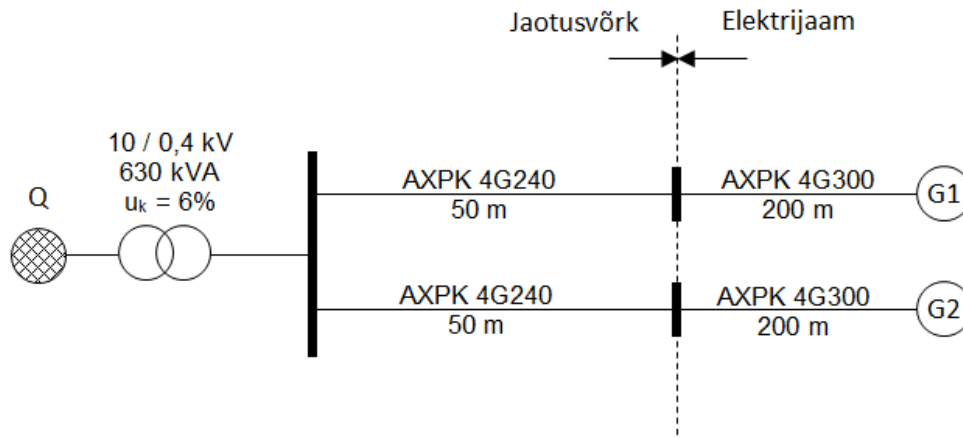
Seadmete termilise taluvuse kontrollalgoritm (Joonis 5.7) põhineb peatükis 4.3 kirjeldatud arvutuskäigul. Hindamiseks on tarvilik määrata nii suurim ülimööduv kui püsilühisvool. Nende alusel leitud termoekvivalentse lühisvoolu võrdlemine seadme normeeritud väärtustega sõltub võrgu kaitseseadmete rakendusparameetritest ehk lühise kestusest.



Joonis 5.7. Termilise taluvuse hindamisalgoritm

**Näide 5.7.** Madalpingevõrguga liitub kaks ühesuguste parameetritega tootmisseedet. Liitumispunktid asuvad liitumiskilbis KP/MP alajaama lähistel. Liitumiskilbist lähtub otsekaabel alajaama madalpinge jaotusseadmesse. Mõlema elektrijaama lepinguline tootmisvõimsus liitumispunktis on piiratud 200 kVA-ni. Teisi kliente KP/MP alajaama toitel ei ole. Hinnata tootmisseedmete mõju jaotusvõrgu primaarseadmete dünaamilisele ning termilisele taluvusele.





Lähteandmed:

$S_n = 315 \text{ kVA}$  (Väljepoolustega sünkroongeneraator)

$\cos\varphi = 0,8$

$U_n = 400 \text{ V}$

$I_n = 455 \text{ A}$

$x_d'' = 7,2 \%$

$x_d = 273 \%$

$U_f = 1,3U_{fn}$

Takistused:

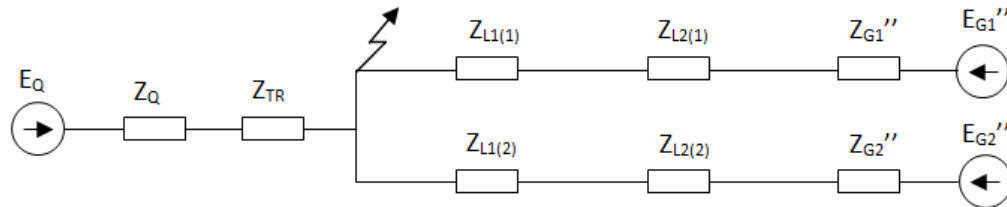
	Tähis aseskeemil	R, $\Omega$	X, $\Omega$	Z, $\Omega$
AXPK 4G240	L1 <sub>(1;2)</sub>	0,14 $\Omega$ /km = 0,007	0,08 $\Omega$ /km = 0,004	0,0081
AXPK 4G300	L2 <sub>(1;2)</sub>	0,114 $\Omega$ /km = 0,0228	0,08 $\Omega$ /km = 0,016	0,0279
Jõutrafo	TR	0,0038	0,0157	0,0162
Elektrisüsteem	Q	0,0084	0,0079	0,0115

Jaotusvõrgu primaarseadmete lühisvoolutaluvused:

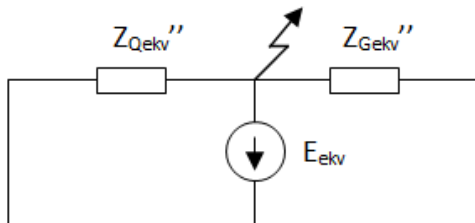
	Termiline	Dünaamiline
Trafo 630 kVA	22,7 kA 2 s	-
Alajaama MP jaotusseade	25 kA 1 s	63 kA
AXPK 4G240	22,6 kA 1 s	-

Lühisvoolutaluvuselt osutuvad vaadeldavas võrguosas kitsaskohaks madalpingekaablid AXPK 4G240. Taluvuse hindamiseks vaatleme võimalikku suurimat lühisvoolu valitud kaabli võrgupoolses otsas.

Vaadeldava elektrivõrgu aseseemi koostamine:



Aseseemi lihtsustamine:



Ülimööduva lühisvoolu arvutamine:

$$E_{ekv} = \frac{c \cdot U_{nF}}{\sqrt{3}} = \frac{1,1 \cdot 400}{\sqrt{3}} = 254,034 \text{ V}$$

$$z_{Qekv}'' = z_Q + z_{TR} = 0,0115 + 0,0162 = 0,0277 \text{ } \Omega$$

$$z_{G1}'' = z_{G2}'' = x_d'' \cdot \frac{U_n}{S_n} = 0,072 \cdot \frac{400^2}{315000} = 0,0366 \text{ } \Omega$$

$$z_{Gekv}'' = \frac{(z_{L1(1)} + z_{L2(1)} + z_{G1}'') \cdot (z_{L1(2)} + z_{L2(2)} + z_{G2}'')}{(z_{L1(1)} + z_{L2(1)} + z_{G1}'') + (z_{L1(2)} + z_{L2(2)} + z_{G2}'')} \\ = \frac{(0,0081 + 0,0279 + 0,0366) \cdot (0,0081 + 0,0279 + 0,0366)}{(0,0081 + 0,0279 + 0,0366) + (0,0081 + 0,0279 + 0,0366)} = 0,0363 \text{ } \Omega$$

$$z_{ekv}'' = \frac{z_{Qekv}'' \cdot z_{Gekv}''}{z_{Qekv}'' + z_{Gekv}''} = \frac{0,0277 \cdot 0,0363}{0,0277 + 0,0363} = 0,0157 \text{ } \Omega$$

$$I_k'' = \frac{E_{ekv}}{z_{ekv}''} = \frac{254,034}{0,0157} = 16,181 \text{ kA}$$

Püsilühisvoolu arvutamine:

$$\frac{I''_G}{I_{nG}} = \frac{\left(\frac{254,034}{0,0363}\right)}{455 + 455} = 7,69$$

$$\lambda_{\min}(\text{graafikult}) = 1,1$$

$$\lambda_{\max}(\text{graafikult}) = 2,2$$

$$I_G^\infty = \lambda I_{nG} = 2,2 \cdot 910 = 2,002 \text{ kA}$$

$$I_Q^\infty = I''_Q = \frac{254,034}{0,0277} = 9,171 \text{ kA}$$

$$I_k^\infty = I_G^\infty + I_Q^\infty = 11,173 \text{ kA}$$

Termoekvivalentse lühisvoolu arvutamine:

$$R''_{Qekv} = R_Q + R_{TR} = 0,0084 + 0,0038 = 0,0122 \Omega$$

$$X''_{Qekv} = X_Q + X_{TR} = 0,0079 + 0,0157 = 0,0236 \Omega$$

$$\begin{aligned} R''_{Gekv} &= \frac{(R_{L1(1)} + R_{L2(1)} + R''_{G1}) \cdot (R_{L1(2)} + R_{L2(2)} + R''_{G2})}{(R_{L1(1)} + R_{L2(1)} + R''_{G1}) + (R_{L1(2)} + R_{L2(2)} + R''_{G2})} \\ &= \frac{(0,007 + 0,0228 + 0) \cdot (0,007 + 0,0228 + 0)}{(0,007 + 0,0228 + 0) + (0,007 + 0,0228 + 0)} = 0,0149 \Omega \end{aligned}$$

$$X''_{Gekv} = \sqrt{Z_{Gekv}^2 - R_{Gekv}^2} = \sqrt{0,0363^2 - 0,0149^2} = 0,0331 \Omega$$

$$R''_{ekv} = \frac{R''_{Qekv} \cdot R''_{Gekv}}{R''_{Qekv} + R''_{Gekv}} = \frac{0,0122 \cdot 0,0149}{0,0122 + 0,0149} = 0,0067 \Omega$$

$$X''_{ekv} = \frac{X''_{Qekv} \cdot X''_{Gekv}}{X''_{Qekv} + X''_{Gekv}} = \frac{0,0236 \cdot 0,0331}{0,0236 + 0,0331} = 0,0138 \Omega$$

$$\frac{R}{X} = \frac{0,0067}{0,0138} = 0,4855$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3R}{X}} = 1,02 + 0,98e^{-3 \cdot 0,4855} = 1,2484$$

$$\frac{I''_k}{I_k^\infty} = \frac{16,181}{11,173} = 1,4482$$

Kolmefaasilise lühise kestuse valitud punktis määravad kaitseseade alajaama jaotusseadmes ning liigvoolukaitse generaatoril. Alajaama jaotusseadest väljuvat kaablit kaitstakse gG tüüpi sulavkaitsmetega nimivooluga 315 A. Seda läbiv ülimööduv vool moodustub elektrisüsteemi ning kõrvalfiidris paikneva tootmiseseadme lühisvoolude summast ning on 14,6721 kA. Selline vool põhjustab standardikohase gG315 A sulari rakendumise hetkeliselt ehk 0,01 sekundiga.

Tootmiseseadme poolt toidab lühist ülimööduv vool 3,4991 kA. Generaatori kontrollid eraldab seadme võrgust liigvoolul 430 A 0,2 sekundi jooksul. Kuna tootmiseseadme haru lühisvool on piisavalt väikene võtame lühise kestuseks sulavkaitsme rakendumisaja.

Termilise taluvuse hindamine:

$$m(\text{graafikult}) = 0,65$$

$$n(\text{graafikult}) = 0,99$$

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{(m + n)} = 16,181 \sqrt{0,65 + 0,99} = 20,722 \text{ kA}$$

$$t_k = 0,01 \text{ s}$$

$$t_n = 1 \text{ s}$$

$$\text{kuna } t_k \leq t_n$$

$$\text{peab kehtima tingimus } I_{th} \leq I_{thn}$$

$$20,722 \text{ kA} \leq 22,6 \text{ kA}$$

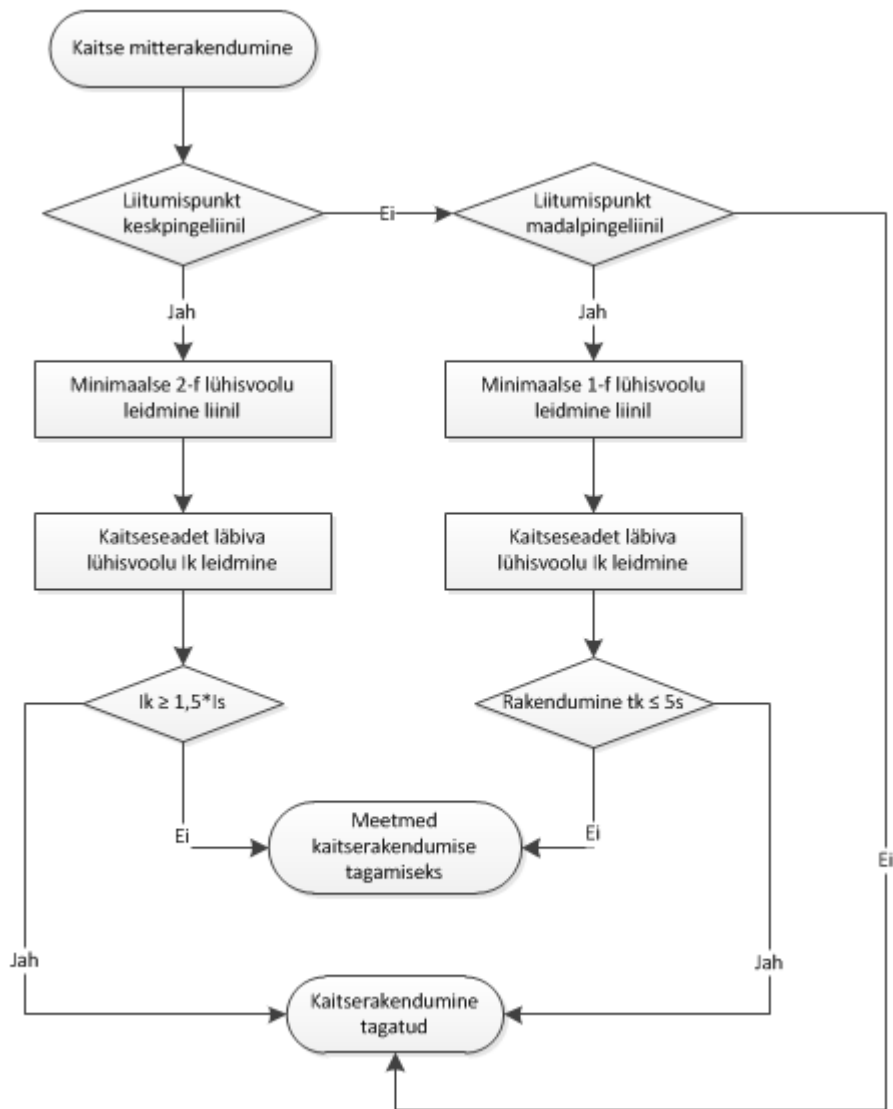
Tulemus:

Seadmete lühisvoolutaluvused on antud näite puhul tagatud. Arvutuskäigust järeldub, et lühisvoolutaluvuste täpne hindamine on sellisel meetodil küllalt aeganõudev, mistõttu ka lühisvoolude korral võib osutada vajalikuks arvutustarkvara kasutamine. Kiire üldhinnangu andmiseks võib kasutada lihtsat rusikareeglit, mille kohaselt on erinevat tüüpi tootmiseseadmete ülimööduv lühisvool võrdne järgmiste suurustega [4]:

- sünkroongeneraatoritel 8-kordse nimivooluga
- asünkroongeneraatoritel ja kaksistoitelistel asünkroongeneraatoritel 6-kordse nimivooluga
- inverteritel 1-kordse nimivooluga

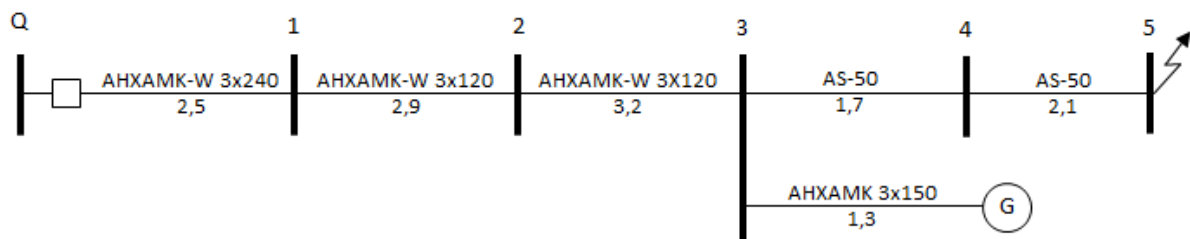
## 5.6. Kaitserakendumine

Kaitseseadmete mitterakendumise võimaluse kontrollimisel tuleb eristada liitumist madal- või keskpinge võrguga. Keskpinge võrgus on minimaalseks reeglina kahefaasiline lühisvool ning kaitserakendumisel peab tundlikkus olema tagatud teguri väärtusega vähemalt 1,5. Madalpingel tuleb vaadelda ühefaasilist lühisvoolu ning kontrollida kaitse rakendumist enimalt 5 sekundi jooksul.



Joonis 5.8. Kaitse mitterakendumise hindamisalgoritm

**Näide 5.8.** 2 MVA nimivõimsusega sünkroongeneraatori mõju hindamine fiidrikaitsme voolulõike funktsiooni rakendumisele.



Joonis 5.9. Keskpingefiidri näidisskeem kaitse mitterakendumise hindamisel

Lähteandmed:

$$S_n = 2000 \text{ kVA}$$

$$U_n = 10000 \text{ V}$$

$$x_d'' = 8 \%$$

$$L = 470 \text{ A; } 0,2 \text{ s}$$

Minimaalne lühisvool keskpingevõrgus ja maksimaalne lühisvool madalpingel.

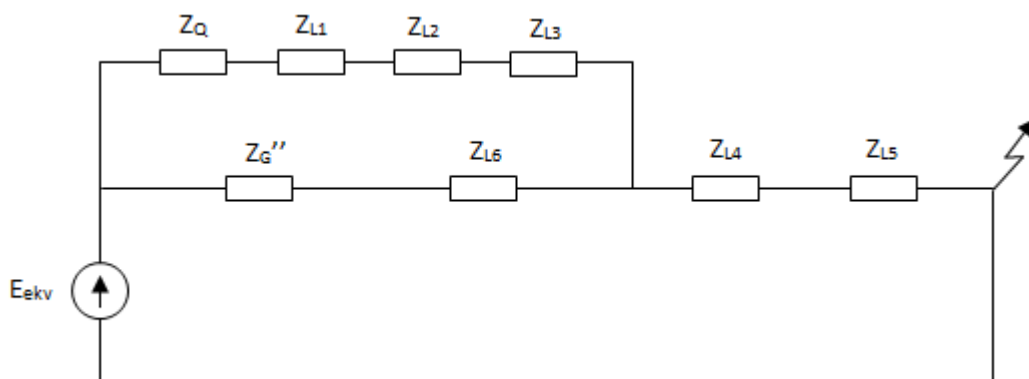
$$I_{kmin}(\text{ilma tootmisseedmeta}) = 875 \text{ A}$$

$$I_{kmax(MP)} = 358,8 \text{ A}$$

Takistused:

Liinilõik	Tähis aseseemil	R/km	X/km	Pikkus, km	R, $\Omega$	X, $\Omega$	Z, $\Omega$
Q - 1	L1	0,125	0,110	2,5	0,313	0,275	0,416
1 -2	L2	0,253	0,120	2,9	0,734	0,348	0,812
2 -3	L3	0,253	0,120	3,2	0,810	0,384	0,896
3 -4	L4	0,700	0,297	1,7	1,190	0,505	1,293
4 -5	L5	0,700	0,297	2,1	1,470	0,624	1,597
Gen. haru	L6	0,206	0,120	1,3	0,268	0,156	0,310
Süsteem	Q				0,880	1,310	1,578

Vaadeldava elektrivõrgu aseseem:



Ülimööduva lühisvoolu arvutamine:

$$Z_G'' = x_d'' \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,08 \cdot \frac{10000^2}{2000000} = 4 \Omega$$

$$Z_{\Sigma} = \frac{(Z_Q + Z_{L1} + Z_{L2} + Z_{L3}) \cdot (Z_G'' + Z_{L6})}{(Z_Q + Z_{L1} + Z_{L2} + Z_{L3}) + (Z_G'' + Z_{L6})} + Z_{L4} + Z_{L5} = \frac{3,702 \cdot 4,31}{3,702 + 4,31} + 1,293 + 1,597$$

$$= 4,881 \Omega$$

$$E_{ekv} = c \frac{U_{nF}}{\sqrt{3}} = 1 \cdot \frac{10000}{\sqrt{3}} = 5773,503 \text{ V}$$

$$I_{k\Sigma} = \frac{E_{ekv}}{Z_{\Sigma}} = \frac{5773,503}{4,881} = 1182,852 \text{ A}$$

Fiidrikaitset läbiva lühisvoolu arvutamine:

$$\Delta U_2 = I_k \cdot (Z_4 + Z_5) = 3418,442 \text{ V}$$

$$\Delta U_1 = 5773,503 - 3418,442 = 2355,061 \text{ V}$$

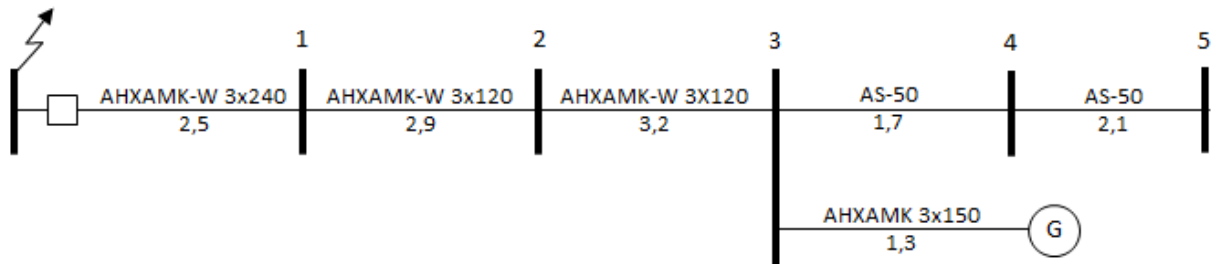
$$I_{k1} = \frac{\Delta U_1}{(Z_Q + Z_{L1} + Z_{L2} + Z_{L3})} = \frac{2355,061}{3,702} = 636,159 \text{ A}$$

Fiidrikaitset läbiv lühisvool väheneb 875 A-lt 636,159 A-ni. Kiire lühiskaitse ehk voolulõike sätte määramisel on pea kaitse tundlikkus olema vähemalt 1,5 [27]. See tähendab, et tootmiseseadme liitumisel tuleks sätet alandada vähemalt väärtuseni  $636,159/1,5 = 426,106 \text{ A}$ . Teine lühiskaitse tingimus on, et see ei tohi rakenduda lühisele suurimale võimalikule lühisvoolule madalpingevõrgus. Selleks peab antud juhul voolulõike sätte olema vähemalt  $1,3 \cdot 358,8 = 466,44 \text{ A}$ .

Tulemus:

Fiidrikaitse kiire lühiskaitse ehk voolulõike rakendumine etteantud määratud ajasätte jooksul võib olla häiritud kuna generaatori osalühisvool vähendab fiidrikaitset läbivat lühisvoolu selle alghetkel. Kuna fiidrikaitse sätte alandamine ei ole võimalik tuleb seada piirangud tootmiseseadme poolt lubatavale lühisvoolule või kasutada fiidrikaitset liini takistusele reageerivat distantskaitset. Distantskaitse eelis seisneb võimaluses eristada lühistakistuse aktiiv- ja reaktiivkomponenti eeldusel, et lühisel on reaktiiv- ja aktiivtakistuse suhe  $X/R$  oluliselt erinev kui normaalolukorras, kus koormus omab peamiselt aktiivkomponenti.

**Näide 5.9.** Generaatori osalühisvoolust põhjustatud fiidrikaitsme rakendumise võimaluse hindamine lühisel kõrvalfiidris või piirkonnaalajaama jaotusseadmes. Kasutatakse eelmises näites toodud lähteandmeid.



Joonis 5.10. Keskpingefiidri näidisskeem kaitse liigrakendumise hindamisel

Lähteandmed:

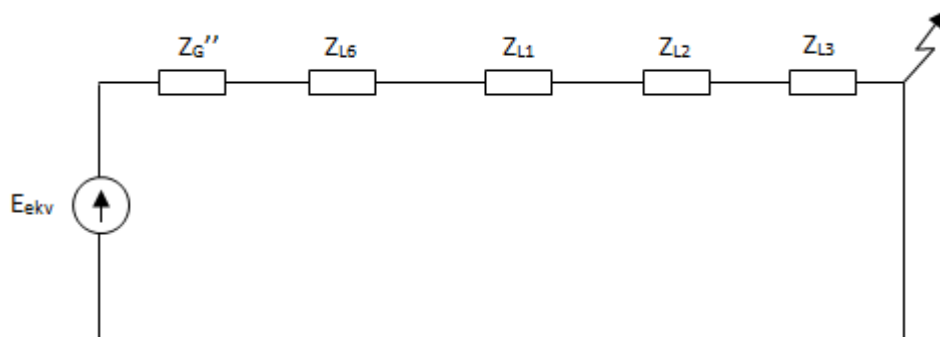
$$S_n = 2000 \text{ kVA}$$

$$U_n = 10000 \text{ V}$$

$$x_d'' = 8 \%$$

$$L = 470 \text{ A}; 0,2 \text{ s}$$

Vaadeldava elektrivõrgu aseskeem:



Ülimööduva lühisvoolu arvutamine:

$$Z_G'' = x_d'' \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 4 \Omega$$

$$Z_\Sigma = Z_G'' + Z_{L6} + Z_{L1} + Z_{L2} + Z_{L3} = 4 + 0,31 + 0,416 + 0,812 + 0,896 = 6,434 \Omega$$

$$E_{ekv} = c \frac{U_{nF}}{\sqrt{3}} = 1,1 \cdot \frac{10000}{\sqrt{3}} = 6350,853 \text{ V}$$

$$I_{k\Sigma} = \frac{E_{ekv}}{Z_\Sigma} = \frac{6350,853}{6,434} = 987,077 \text{ A}$$



Tulemus:

Tootmiseseadme maksimaalne osalühisvool on suurem kui minimaalne lühisvool fiidri lõpus, mistõttu võib lühis kõrvalasuvatel fiidritel või piirkonnaalajaama lattidel rakendada suunamata fiidrikaitse. Efektiivne lahendus nimetatud probleemile on suunatud voolukaitse kasutuselevõtt, mille saab seada rakenduma sõltuvalt lühisvoolu suunast.

## 6. MÕÕTETULEMUSI ELEKTRITOOTJATE JUURES

### 6.1. Elektritootjate loetelu

Käesolevas peatükis esitatakse pinge kvaliteedi mõõtetulemusi Elektrilevi OÜ keskpingevõrku ühendatud elektritootmiseseadmete liitumispunktides ning võrreldakse mõningaid neist arvutuslikul teel saadud tulemustega. Toitepinge kvaliteedi mõõtmised pärinevad perioodist 01.2014 – 05.2014. Mõõteseadetena kasutatakse statsionaarseid klass A mõõtemetoodikale vastavaid pingekvaliteedianalüsaatoreid. Arvutuslikud tulemused on saadud eelmises peatükis väljapakutud algoritmide lahendamise tulemusena.

Tabel 6.1. Elektrienergia tootjad Elektrilevi OÜ keskpingevõrgus

nr	Elektrijaama tüüp	Tootmiseseadmete tüüp	Nimivõimsus, $S_n$	Liitumispunkti asukoht
1	Soojuselektrijaam	Sünkroongeneraator	1496 kVA	15 kV fiidril
2	Soojuselektrijaam	Sünkroongeneraator	2475 kVA	10 kV fiidril
3	Soojuselektrijaam	Lühisrootoriga asünkroongeneraator	2527 kVA	10 kV fiidril
4	Tuuleelektrijaam	Lühisrootoriga asünkroongeneraator	2300 kVA	Piirkonnaalajaama 10 kV jaotusseadmes
5	Tuuleelektrijaam	Lühisrootoriga asünkroongeneraator	3 x 660 kVA	Piirkonnaalajaama 10 kV jaotusseadmes
6	Tuuleelektrijaam	Muundur	2300 kVA	Piirkonnaalajaama 6 kV jaotusseadmes

### 6.2. Toitepinge aeglased muutused

#### Elektrijaam nr. 1

$$S_{lub} = 1200 \text{ kVA} (\cos\varphi = 1)$$

$$U_{max} (\text{liitumisele eelnevalt}) = 15,75 \text{ kV}$$

$$R = 4,364 \Omega$$

$$X = 3,398 \Omega$$

arvutuslik  $dU = 2,33 \%$

arvutuslik  $U_{\max}$  (koormuseta olukord) =  $15,75 + 2,33 \%$  = 16,12 kV

Kahe kuu jooksul fikseeritud liinipingete 10-minuti keskmistatud väärtused jäävad üldiste normide piiridesse. Maksimaalsed fikseeritud mõõtetulemused jäävad arvutuslikest väiksemaks:

$U_{L12\max} = 16,09 \text{ kV}$

$U_{L23\max} = 16,03 \text{ kV}$

$U_{L31\max} = 16,03 \text{ kV}$



Joonis 6.1. Liinipingete monitoring elektrijaama nr. 1 liitumispunktis

## Elektrijaam nr. 2

$S_{\text{lub}} = 2000 \text{ kVA}$  ( $\cos\varphi = 1$ )

$U_{\max}$  (liitumisele eelnevalt) = 10,5 kV

$R = 0,0875 \Omega$

$X = 0,077 \Omega$

arvutuslik  $dU = 0,18 \%$

arvutuslik  $U_{\max}$  (koormuseta olukord) =  $10,5 + 0,18 \%$  = 10,52 kV

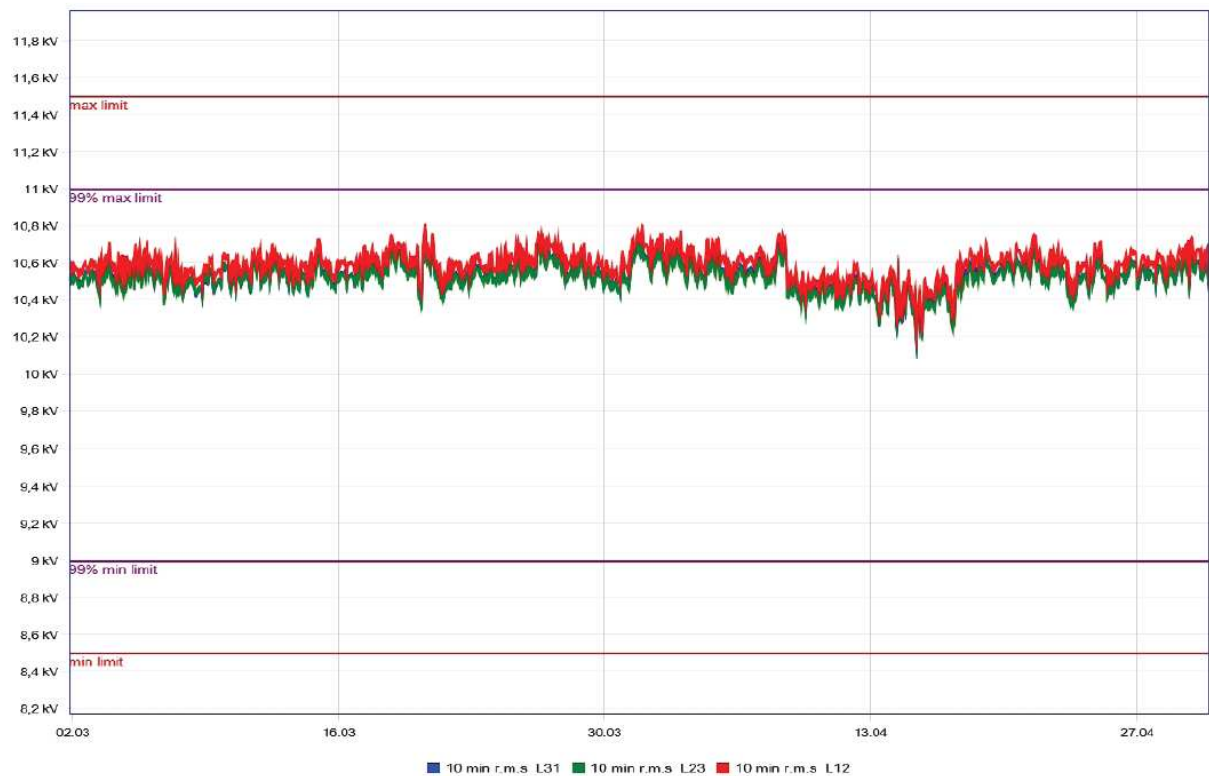
Kahe kuu jooksul fikseeritud liinipingete 10-minuti keskmistatud väärtused jäävad üldiste normide piiridesse kuid maksimaalsed fikseeritud mõõtetulemused ületavad oluliselt arvutuslikku tulemust:

$$U_{L12\max} = 10,81 \text{ kV}$$

$$U_{L23\max} = 10,77 \text{ kV}$$

$$U_{L31\max} = 10,78 \text{ kV}$$

Kuna elektriijaama liitumispunkt paikneb normaalskeemi alusel fiidri alguses võib eeldatavatest suuremate pingemuutuste tõenäoliseks põhjuseks pidada võimalust, kus teatud perioodidel on toimunud keskpingefiidri ümbertoitmine teise toitepunkti kaudu.



Joonis 6.2. Liinipingete monitooring elektriijaama nr. 2 liitumispunktis

### Elektriijaam nr. 3

$$S_{\text{lub}} = 2300 \text{ kVA} (\cos\varphi = 1)$$

$$U_{\text{max}} (\text{liitumisele eelnevalt}) = 10,5 \text{ kV}$$

$$R = 0,547 \ \Omega$$

$$X = 0,144 \Omega$$

$$\text{arvutuslik } dU = 1,26 \%$$

$$\text{arvutuslik } U_{\max} = 10,5 + 1,26 \% = 10,63 \text{ kV}$$

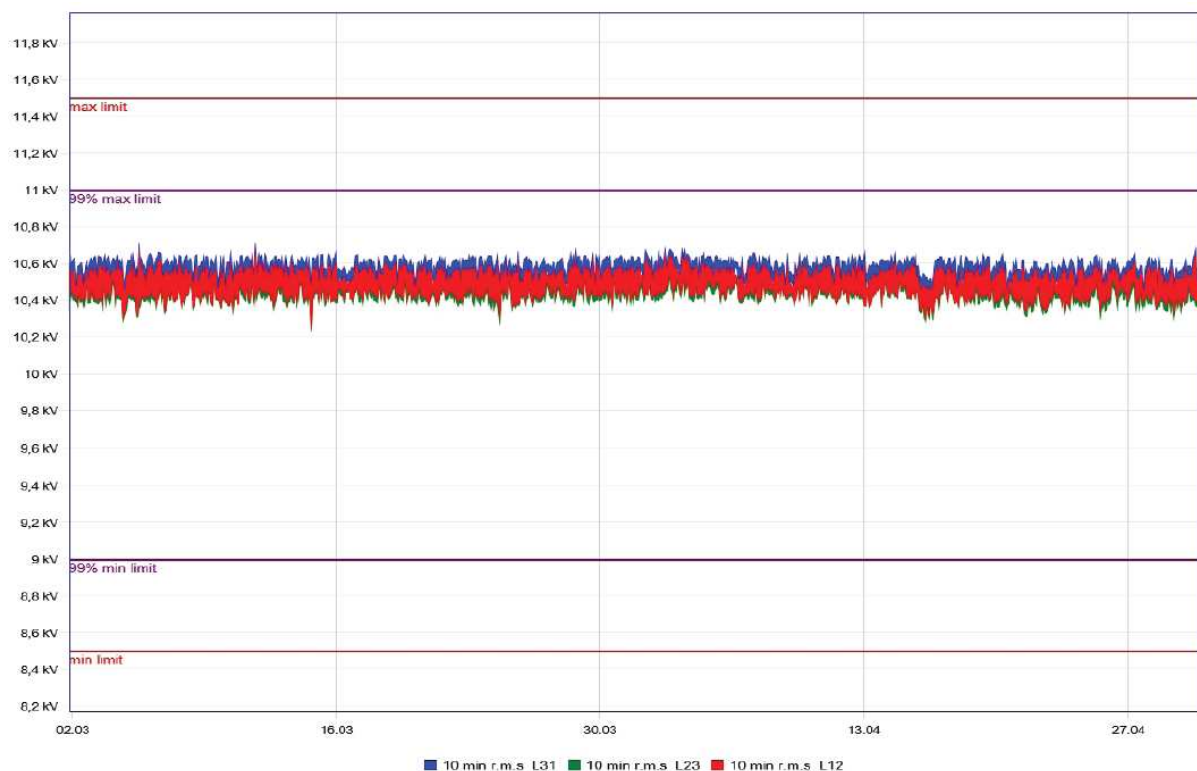
Kahe kuu jooksul fikseeritud liinipingete 10-minuti keskmistatud väärtused jäävad üldiste normide piiridesse. Suurimad liinipingete väärtused ületavad mõnevõrra arvutuslikku väärtust:

$$U_{L12\max} = 10,65 \text{ kV}$$

$$U_{L23\max} = 10,63 \text{ kV}$$

$$U_{L31\max} = 10,69 \text{ kV}$$

Nähtust võib selgitada võimalusega, kus pinge piirkonnaalajaama keskpinge lattidel on normaalsest talitluspingest 10,5 kV kõrgemal, kuid mitte piisavalt selleks et töötaks trafo astmelüliti.



Joonis 6.3. Liinipingete monitoring elektrijaama nr. 3 liitumispunktis

**Elektrijaamad nr. 4 – 6** on ühendatud otse piirkonnaalajaamade keskpinge jaotusseadme lattidele, mistõttu nende mõju toitepinge aeglastele muutustele käesolevaga ei hinnatud.

### 6.3. Üksik kiire pingemuutus

Tabel 6.2. Kiirete pingemuutuste arvutuslikud väärtused

nr	Tootmiseseadmete tüüp	Nimivõimsus, $S_n$	Lülitusparameetrid	dU (arvutuslik)
1	Sünkroongeneraator	1496 kVA	-	-
2	Sünkroongeneraator	2475 kVA	-	-
3	Lühisrootoriga asünkroongeneraator	2527 kVA	$k_{i\max} = 1,2$	5,84 %
4	Lühisrootoriga asünkroongeneraator	2300 kVA	$k_u(\psi_k) = 1,3$	6,6 %
5	Lühisrootoriga asünkroongeneraator	3 x 660 kVA	$k_u(\psi_k) = 0,42$	0,61 %
6	Muundur	2300 kVA	$k_u(\psi_k) = 0,37$	0,75 %

#### Elektrijaam nr. 1 ja 2

Elektrijaamades kasutatavad tootmiseseadmed on sünkroongeneraatorid, millede juhul kontrollitakse kiire pingemuutuse arvutamise asemel sünkroniseerimisparameetrite vastavust nõuetele. Mõlema tootmiseseadme korral on tabelis 4.2 toodud nõuded täidetud. Elektrijaama nr 1 generaatori võrguga sünkroniseerimisest tulenevad pingemuutused on toodud tabelis 6.3.

Tabel 6.3. Kiirete pingemuutuste mõõtetulemusi elektrijaama nr. 1 liitumispunktis

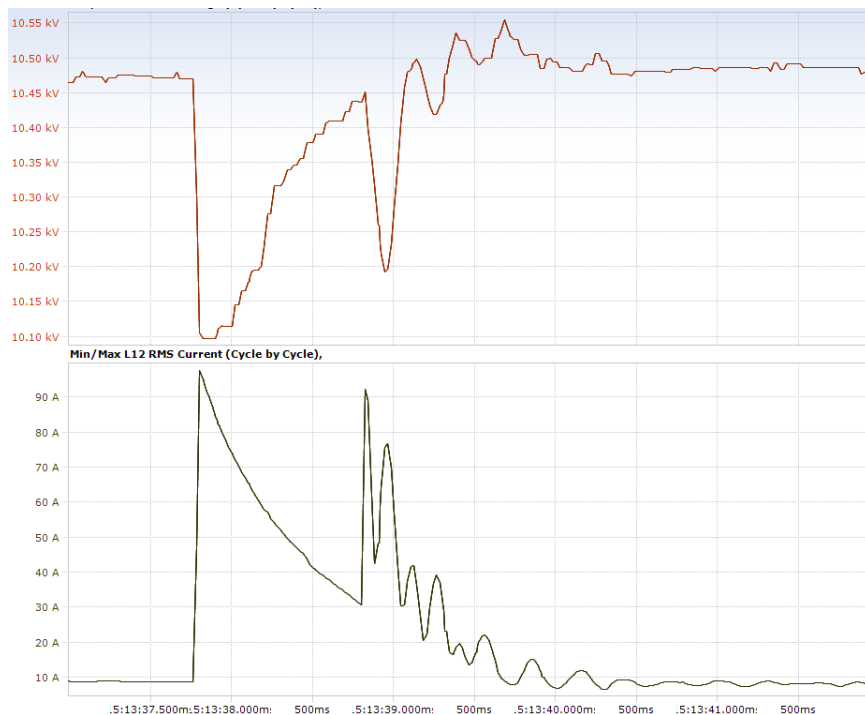
	$U(t_1)$ , V	$U(t_2)$ , V	dU
1	10630	10661	0,31%
2	10585	10624	0,39%
3	10610	10656	0,46%
Keskmine			<b>0,39 %</b>

#### Elektrijaam nr. 3

Tabelis 6.4 on toodud tootmiseseadme võrku lülitamisel põhjustatud kiired pingemuutused. Mõõtetud tulemuste keskmine väärtus on väiksem arvutuslikul teel saadud pingemuutusest.

Tabel 6.4. Kiirete pingemuutuste mõõtetulemusi elektriijaama nr. 3 liitumispunktis

	U(t <sub>1</sub> ), V	U(t <sub>2</sub> ), V	dU
1	9997	10485	4,88%
2	10024	10458	4,34%
3	9982	10439	4,57%
<b>Keskmine</b>			<b>4,60 %</b>



Joonis 6.4. Näide voolu ja pingete efektiivväärtustest elektriijaama nr. 3 tootmiseseadme võrku lülitamisel

#### Elektriijaam nr. 4

Tabelis 6.5 on toodud tootmiseseadme võrku lülitamisest põhjustatud kiired pingemuutused. Mõõtetud tulemuste keskmine väärtus on oluliselt väiksem elektrituuliku tüübikatssetuste protokollis toodud halvimast juhtumist, mistõttu võib arvata, et lülitamistoimingud on sooritatud soodsamatel tingimustel näiteks nimiväärtusest madalama tuulekiiruse juures.

Tabel 6.5. Kiirete pingemuutuste mõõtetulemusi elektriijaama nr. 4 liitumispunktis

	U(t <sub>1</sub> ), V	U(t <sub>2</sub> ), V	dU
1	10408	10648	2,40 %

2	10345	10441	0,96 %
3	10355	10622	2,67 %
Keskmine			<b>2,01 %</b>



Joonis 6.5. Näide voolu ja pingete efektiivväärtustest elektrijaama nr. 4 tootmiseseadme võrku lülitamisel

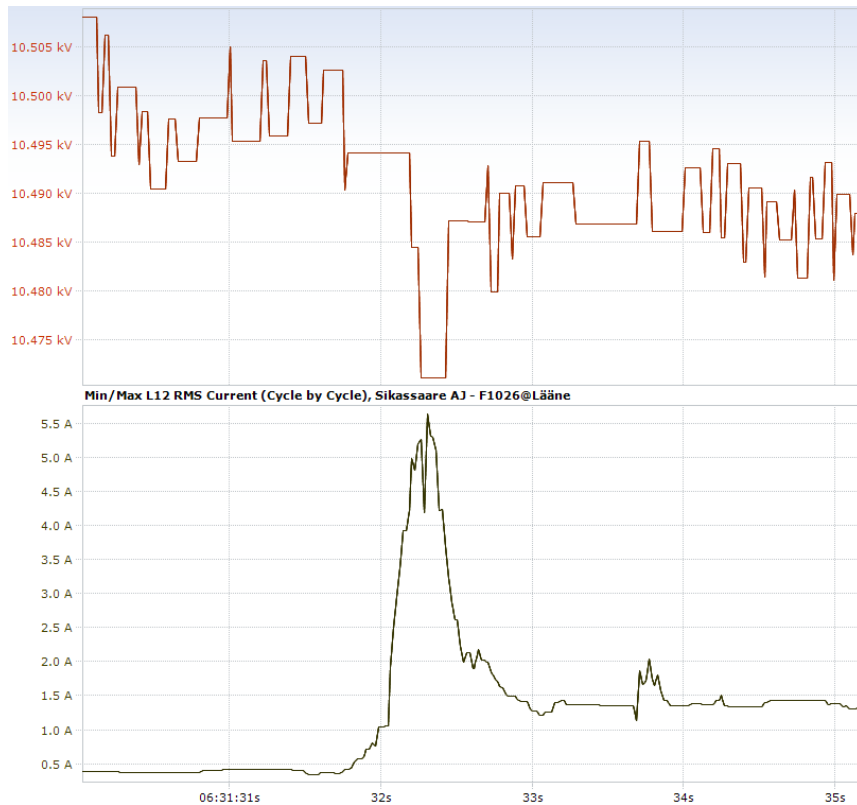
### Elektrijaam nr. 5

Tabelis 6.6 on toodud elektrijaama nr. 5 ühe tuuliku võrku lülitamisest põhjustatud kiired pingemuutused. Mõõtetud tulemuste keskmine väärtus jääb ligikaudu kaks korda väiksemaks elektrituuliku tüübikatsetuste protokollis toodud halvimast juhtumist.

Tabel 6.6. Kiirete pingemuutuste mõõtetulemusi elektrijaama nr. 5 liitumispunktis

	$U(t_1)$ , V	$U(t_2)$ , V	dU
1	10598	10567	0,31 %
2	10516	10477	0,39 %
3	10503	10471	0,32 %
Keskmine			<b>0,34 %</b>





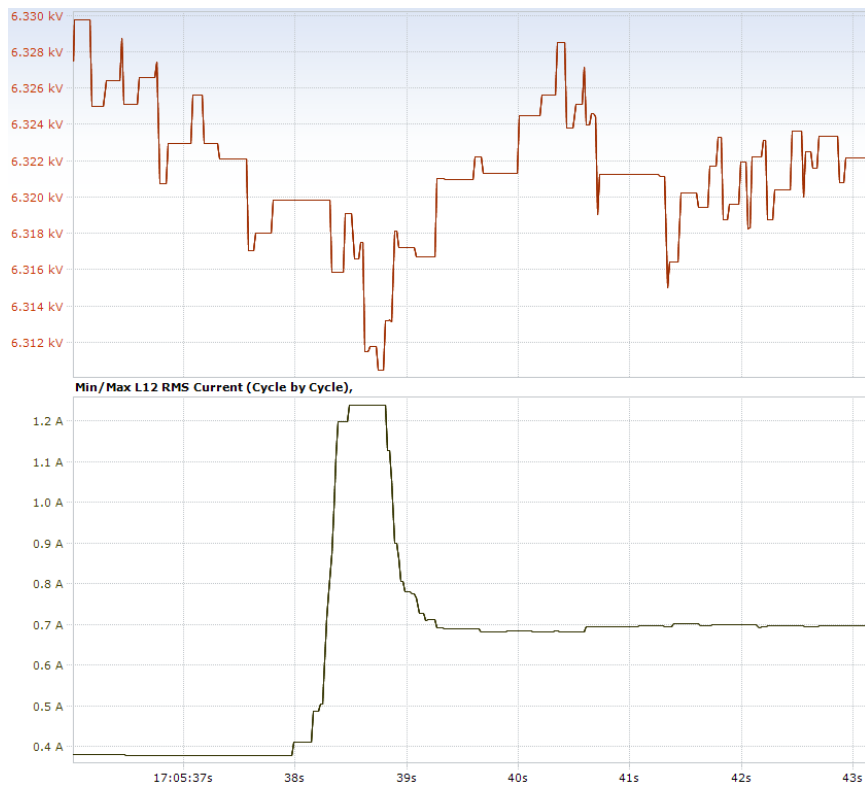
Joonis 6.6. Näide voolu ja pingete efektiivväärtustest elektrijaama nr. 5 tootmiseadme võrku lülitamisel

### Elektrijaam nr. 6

Tabelis 6.7 on toodud elektrituuliku võrku lülitamisest põhjustatud kiired pingemuutused. Taaskord jäävad mõõdetud väärtused oluliselt väiksemaks elektrituuliku tüübikatsetuste protokollis toodud halvimast juhtumist.

Tabel 6.7. Kiirete pingemuutuste mõõtetulemusi elektrijaama nr. 6 liitumispunktis

	$U(t_1)$ , V	$U(t_2)$ , V	dU
1	6320	6310	0,17 %
2	6272	6267	0,083 %
3	6253	6249	0,067 %
<b>Keskmine</b>			<b>0,11 %</b>



Joonis 6.7. Näide voolu ja pingete efektiivväärtustest elektriijaama nr. 6 tootmiselõudme võrku lülitamisel

## 6.4. Värelustugevus

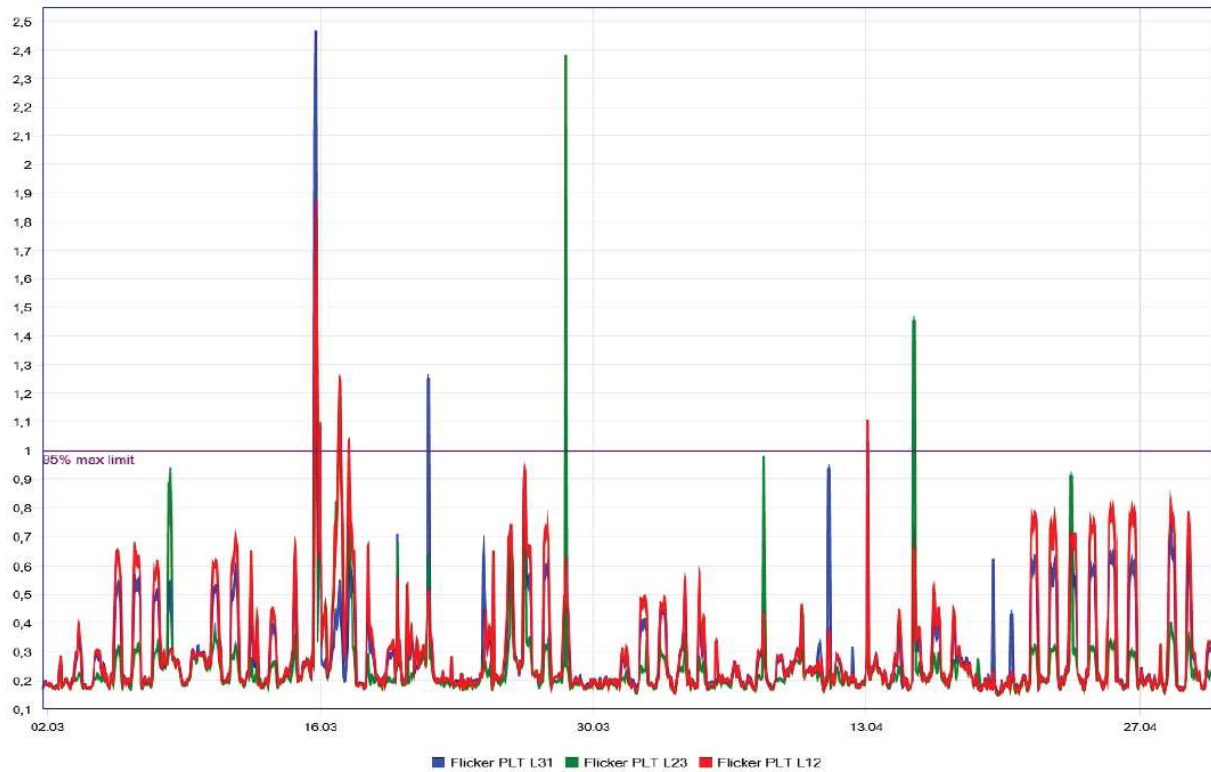
Tabel 6.8. Elektriijaamade tööst tuleneva värelustugevuse arvutustulemused

nr	Tootmiselõudmete tüüp	Nimivõimsus, $S_n$	Värelustegurid	$P_{st}; P_{lt}$ (arvutuslik)
1	Sünkroongeneraator	1496 kVA	-	-
2	Sünkroongeneraator	2475 kVA	-	-
3	Lühisrootoriga asünkroongeneraator	2527 kVA	-	-
4	Lühisrootoriga asünkroongeneraator	2300 kVA	$c(\psi_k) = 6$	0,31
5	Lühisrootoriga asünkroongeneraator	3 x 660 kVA	$c(\psi_k) = 11$	0,28
6	Muundur	2300 kVA	$c(\psi_k) = 1,8$	0,036

Käesolevas punktis on vaatluse alla võetud ainult tuuleelektriijaamad kuna nende primaarenergia kättesaadavus on ainsana suurel määral kõikov. Soojuselektriijaamade stabiilse

töö korral võib täheldada hoopis vastupidist efekti kuna võrgu lühisvõimsus suureneb ning lähedalasuvatest koormustest põhjustatud pingemuutused vähenevad.

#### Elektrijaam nr. 4



Joonis 6.8. Värelustugevuse monitoring elektrijaama nr. 4 liitumispunktis

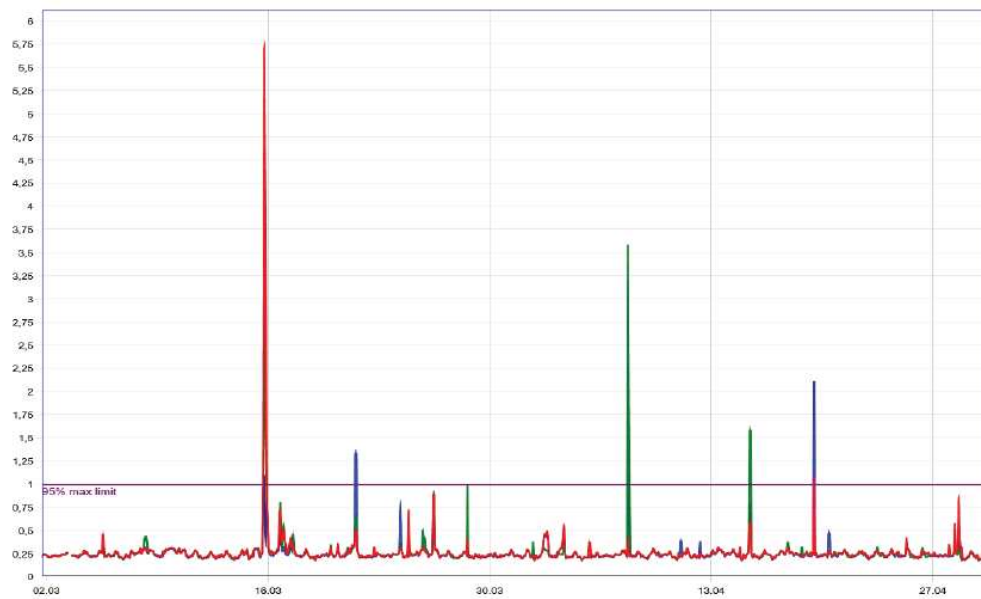
Pikaajalise värelustugevuse maksimaalsed väärtused 95 %-l mõõdetud ajast:

$$P_{ltmax} (L12) = 0,96$$

$$P_{ltmax} (L23) = 0,901$$

$$P_{ltmax} (L31) = 0,65$$

## Elektrijaam nr. 5



Joonis 6.9. Värelustugevuse monitoring elektrijaama nr. 5 liitumispunktis

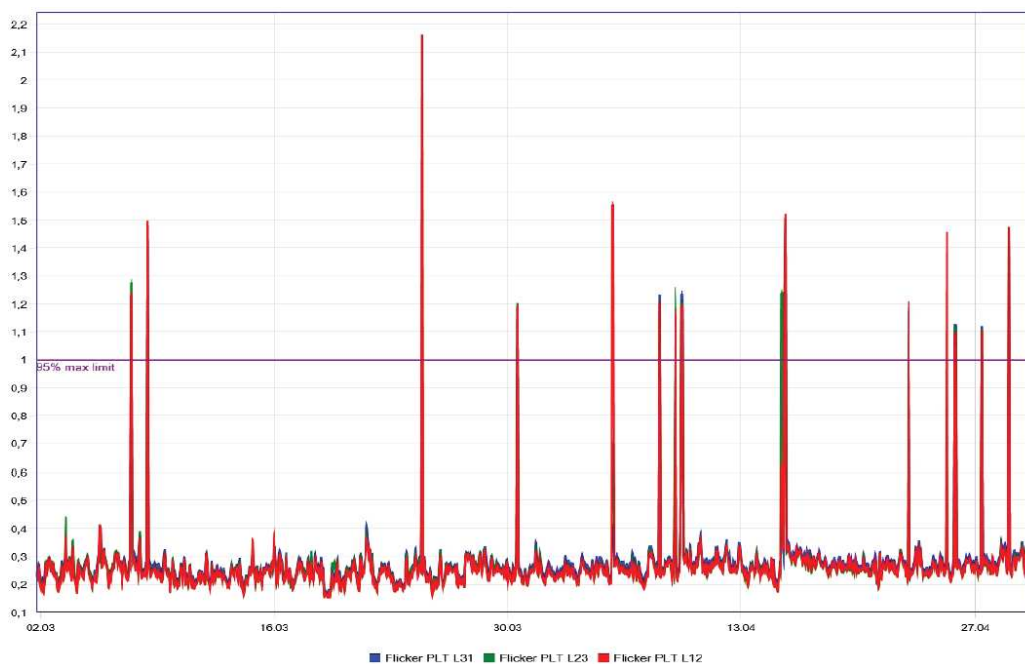
Pikaajalise värelustugevuse maksimaalsed väärtused 95 %-l mõõdetud ajast:

$$P_{ltmax} (L12) = 0,465$$

$$P_{ltmax} (L23) = 0,467$$

$$P_{ltmax} (L31) = 0,437$$

## Elektrijaam nr 6



Joonis 6.10. Värelustugevuse monitoring elektrijaama nr. 6 liitumispunktis

Pikaajalise värelustugevuse maksimaalsed väärtused 95 %-l mõõdetud ajast:

$$P_{ltmax} (L12) = 0,334$$

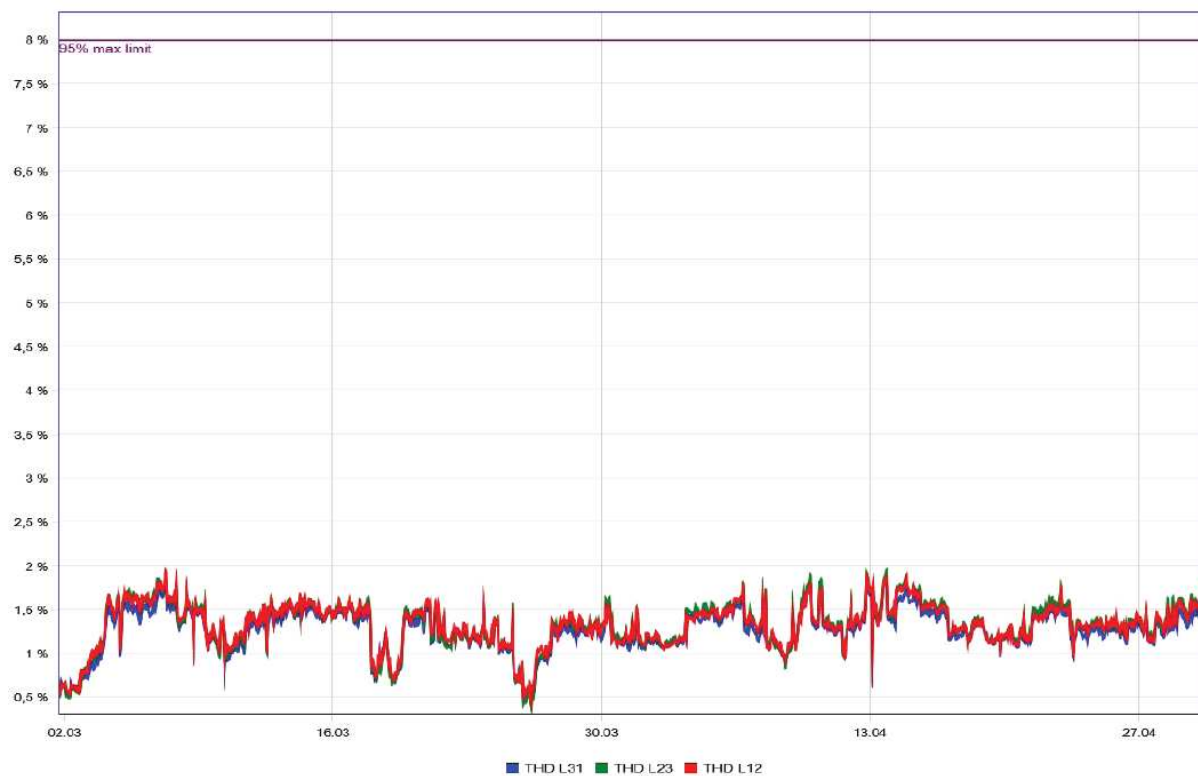
$$P_{ltmax} (L23) = 0,334$$

$$P_{ltmax} (L31) = 0,346$$

Kõikide tuuleelektrijaamade juures läbiviidud värelustugevuse mõõtetulemused toimusid olukorras, kus tootmisseedmed olid normaaltöös. See tähendab, et hinnangu andmine konkreetse elektrijaama poolt põhjustatud värelustugevusele on keeruline. Selleks tuleks vaadelda muutusi elektrijaama väljundvoolus funktsioonina nende esinemiste arvust või sooritada värelustugevuse mõõtmised piisavalt pika perioodi jooksul olukorras kus elektrijaam on võrgust eraldatud.

## 6.5. Kõrgemad harmoonikud

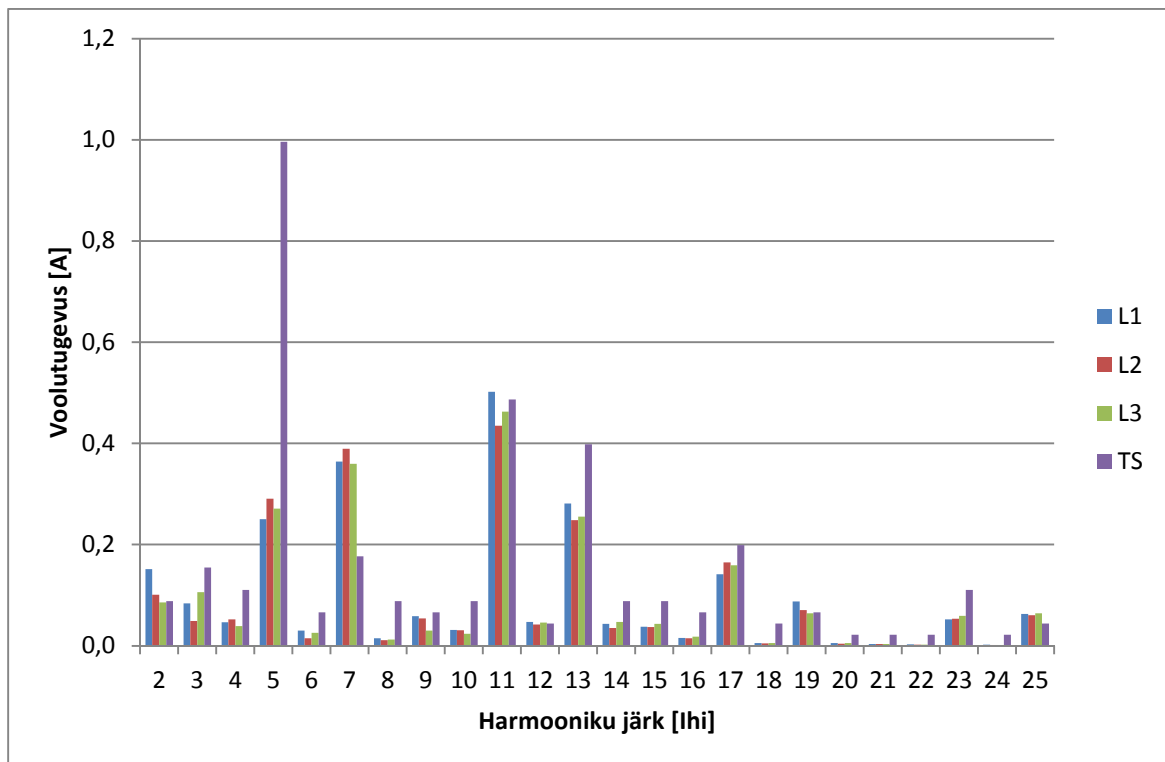
Kõrgemaid vooluharmonikuid põhjustavad mittelineaarse tunnusjoonega seadmed. Antud käsitluses võetakse seetõttu vaatluse alla ainult elektrijaam nr. 6.



Joonis 6.11. Pinge harmoonmoonutusteguri monitoring elektrijaama nr. 6 liitumispunktis

Üldise harmoonmoonutusteguri THD monitooringu põhjal kõrgemad harmoonikud vaadeldavas liitumispunktis probleemiks ei osutu. Suurimad fikseeritud väärtused jäävad kordades väiksemaks lubatavast piirmäärast.

Selleks, et hinnata tuuleelektrijaama mõju pinge harmoonmoonutustegurile vaatleme lisaks keskmisi vooluharmonikute suhteväärtusi. Mõõdetud tulemused on järkude kaupa toodud joonisel 6.12. Võrdlusena on toodud välja ka elektrituuliku tüübikatsetuste protokollis toodud väärtused.



Joonis 6.12. Elektriijaama nr. 6 poolt emiteeritavad vooluharmonikute keskmised väärtused ja nende võrdlus tüübikatsete protokollis tooduga.

Mõõtetulemused näitavad, et elektrituuliku tüübikatsetuste protokollis toodud vooluharmonikute suhteväärtused (TS) jäävad mõõtetulemuste keskmiste väärtustega enamasti samasse suurusjärku. Suuremad erinevused mõõtetud väärtustest esinevad kõrgemate järkude juures, kusjuures alati avaliku võrgu suhtes soodsas suunas. Ainukesena ületatakse tüübikatsetuste põhjal fikseeritud väärtusi vooluharmoniku 7. järgu juures.

## 7. KOKKUVÕTE

Elektrienergia hajatootmisele üleminekul on jaotusvõrgus vaja pöörata tähelepanu järgmistele tehnilistele probleemidele:

1. Pingeniivo tõus. Liitumisele eelnevalt tuleb hinnata võrku antavast aktiiv- ja reaktiivvõimsusest põhjustatud pingetõusu. Arvestada tuleb võimalike minimaalsete koormustega ning olemasolevate elektritootmiseseadmetega.
2. Pinge kõikumine ja värelus. Liitumisele eelnevalt tuleb hinnata lülitamistoimingutest põhjustatud kiireid pingemuutusi ning püsitalitlusest tuleneda võivat värelustugevust. Hinnangu andmisel tuleb võtta aluseks vaadeldavale võrguosale määratud piirnormid.
3. Kõrgemad harmoonikud. Muunduritel põhinevate elektritootmiseseadmete korral tuleb hinnata nende poolt võrku antavat vooluharmoonikute emissiooni. Emissiooni piirnormid tuleb määrata sõltuvalt võrguühenduse läbilaskevõimest ja soovitud tootmisvõimsusest.
4. Lühisvoolude nivoo tõus. Elektritootmiseseadmete liitumisel tuleb arvestada võimaliku lühisvoolude nivoo kasvuga ning hinnata jaotusvõrgu primaarseadmete dünaamilist ja termilist lühisvoolutaluvust.
5. Kaitseseadmete rakendumine. Liitumisele eelnevalt tuleb hinnata elektritootmiseseadmete poolt võrku antavate lühisvoolude mõju jaotusvõrgu kaitseseadmete nõuetekohasele rakendumisele. Võrku antavad lühisvoolud on märkimisväärsed pöörlevatel masinatel ning oluliselt väiksemad muunduritel.

Nimetatud mõjude asjakohane hindamine võimaldab jaotusvõrku planeerida nii, et hajatootmine ei põhjusta üldisi probleeme pinge kvaliteedis või varustuskindluses. Töö käigus selgus, et kõikide teemade käsitlemine on käsitsi arvutamisel küllalt ajakulukas ning soovituslik on vastavate arvutustarkvarade kasutuselevõtt ja rakendamine.

Mitmed töös käsitletud teemad annavad ainet edasiseks uurimistööks. Pingeniivo tõusu täpsemaks hindamiseks tuleks lähemalt uurida koormusmiinimumi määramise põhimõtteid ning üheaegsustegurite rakendamise võimalusi elektrienergia hajatootmisel. Värelustugevuse mõõtetulemuste paremaks hindamiseks tasub mõelda sarnase määratluse loomise peale

lähtuvalt voolust. Eraldi arendustegevusena vääril käsitlemist püsiseisundi ja lühiserežiimide modelleerimine hajatootmise tingimustes.



## KASUTATUD KIRJANDUS

1. EVS-EN 50160:2010. Elektri jaotusvõrkude pinge tunnussuurused. – Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2011. – 40 lk.
2. Meldorf, M.; Tammoja, H.; Treufeldt, Ü.; Kilter, J. Jaotusvõrgud. – Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2007. – 546 lk.
3. EVS-EN 61000-3-3:2008. Elektromagnetiline ühilduvus / Osa 3-3: Piirväärtused. Pingemuutude, pingekõikumiste ja pingeväreluse piiramine avalikes madalpingelistes elektrivarustussüsteemides tingimusteta ühendatavate seadmete puhul nimivooluga kuni 16 A faasi kohta. – Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2008. – 25 lk.
4. Technical Guideline. Generating plants connected to the medium-voltage network (Guideline for generating plants' connection to and parallel operation with the medium-voltage network). – Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW), 2008. – 130 lk.
5. EVS-EN 61400-21:2008. Elektrituulikud / Osa 21: Elektrivõrguga ühendatud elektrituulikute elektri kvaliteedi näitajate mõõtmine ja hindamine. – Tallinn: Eesti standardikeskus, 2008. – 60 lk.
6. Jänes, H.; Kaasik, P.; Puusepp E.; Voldek A. Elektrimasinad. – Tallinn: Eesti riiklik kirjandus, 1961. – 648 lk.
7. VDE-AR-N 4105:2011-08. Power generation systems connected to the low-voltage distribution Network. Technical minimum requirements for the connection to and parallel operation with low-voltage distribution networks. – Forum Network Technology/Network operation within VDE (FNN), 2011. – 78 lk.
8. IEEE Application Guide for IEEE Std 1547™. IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. – New York: IEEE Standards Coordinating Committee 21, 2008. – 207 lk.
9. EVS-EN 61000-3-11:2001. Elektromagnetiline ühilduvus / Osa 3-11: Piirväärtused. Pingemuutude, pingekõikumiste ja pingeväreluse piiramine avalikes madalpingelistes elektrivarustussüsteemides ühendustingimuste kohaselt ühendatavatele seadmetele nimivooluga kuni 75 A. – Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2001. – 31 lk.
10. IEC/TS 61000-3-5. Electromagnetic compatibility (EMC) / Part 3-5: Limits. Limitation of voltage fluctuations and flicker in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 75 A. – Geneva: IEC Central Office, 2009. – 21 lk.
11. IEC/TR 61000-3-7. Electromagnetic compatibility (EMC) / Part 3-7: Limits. Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems. – IEC, 2008. – 65 lk.
12. EVS-EN 61000-3-2:2006. Elektromagnetiline ühilduvus / Osa 3-2: Piirväärtused. Vooluharmoniliste emissiooni lubatavad piirväärtused (seadmetel sisendvooluga kuni 16 A faasi kohta). – Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2006. – 57 lk.
13. EVS-EN 61000-3-12:2005. Elektromagnetiline ühilduvus / Osa 3-12: Piirväärtused. Avalikesse madalpingevõrkudesse ühendatud seadmete poolt genereeritud

- vooluharmoniliste piirväärtused sisendvoolu korral üle 16 A, kuid mitte üle 75 A faasi kohta. – Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2005. – 53 lk.
14. IEC/TR 61000-3-6. Electromagnetic compatibility (EMC) / Part 3-6: Limits. Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems. – IEC, 2008. – 52 lk
  15. EVS-EN 60909-0:2002. Short circuit currents in three-phase a.c. systems / Part 0: Calculation of currents. – Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2002. – 137 lk.
  16. Treufeldt, Ü. Lühised elektrisüsteemides. – Tallinn: TTÜ Elektroenergeetika instituut, 2002. – 158 lk.
  17. Gevorgian, V.; Muljadi, E. Wind Power Plant Short Circuit Current Contribution for Different Fault and Wind Turbine Topologies. - National Renewable Energy Laboratory, 2010. – 11 lk.
  18. Vestas V47 Generator data. - Vestas Wind Systems A/S, 2002. – 63 lk.
  19. Karaliolios, P.; Ishchenko, A.; Coster, E.; Myrzik, J.; Kling, W. Overview of Short-Circuit Contribution of Various Distributed Generators on the Distribution Network. - UPEC 2008. 43rd International Universities Power Engineering Conference, 2008. – 6 lk.
  20. IEEE Canada kodulehekül <http://www.ieee.ca/epec11/admin/S03.pdf>. Vaadatud 27.05.2014.
  21. Jenkins, N.; Ekanayake, J.B.; Strbac. Distributed Generation. – London: The Institution of Engineering and Technology, 2010. – 278 lk.
  22. Howard, D.F. Short - circuit currents in wind-turbine generator networks. - Georgia Institute of Technology, 2013. – 248 lk.
  23. Danfoss Solar inverters A/S kodulehekül <http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/F2638DDA-90D1-4CD2-8EF0-A2D89B940B44/0/TLXEN50438Conformity.pdf>. Vaadatud 27.05.2014.
  24. Vikesjö, J.; Messing, L.; Power, G. Wind Power and Fault Clearance. Elforsk rapport 10:99. – Stockholm: Elforsk A, 2011. – 116 lk.
  25. Myrzik, J.; Kling, W.; Coster, E. Effect of DG on distribution grid protection. – InTech, 2010. – 28 lk.
  26. Mahat, P. Control and operation of islanded distribution system. Doktoritöö. – Aalborg: Aalborg University, Faculty of Engineering, Science and Medicine, 2010. – 174 lk.
  27. Tammoja, H. Automaatika ja relekaitse. Loengukonspekt. – Tallinn: TTÜ elektroenergeetika instituut, 2006. – 100 lk.