



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

---

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

HAJATOOTJATE MÕJU ELEKTRIVÕRGU  
SÕLMEKOORMUSTE AGREGEERITUD MUDELITELE  
INFLUENCE OF DISTRIBUTED GENERATION ON THE AGGREGATED LOAD  
MODELS OF THE BUS LOADS  
MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Pärtel Tani

Üliõpilaskood: 153508AAVM

Juhendajad: Dotsent Jako Kilter

Doktorant  
Madis Leinakse

Tallinn, 2017.a.

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” ..... 201.....

Autor: .....  
/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 201.....

Juhendajad: .....  
/ allkiri /

.....  
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....  
/ nimi ja allkiri /

# Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Pärtel Tani	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Hajatootjate mõju elektrivõrgu sõlmekoormuste agregeeritud mudelitele	
<i>Kuupäev:</i> 25.05.2017	106 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja(d):</i> dotsent Jako Kilter, doktorant Madis Leinakse	
<i>Töö konsultant (konsultandid):</i> doktorant Tanel Sarnet (PSCAD mudel)	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Käesoleva lõputöö eesmärgiks on uurida hajatootmisseadmete mõju võrgu sõlmekoormusele. Antakse teoreetiline ülevaade hajatootmisseadmete põhilistest tüüpidest ning kasutusel olevatest levinumatest koormusmudelitest. Mõju hindamiseks koostatakse PSCAD modelleerimistarkvaras Sikassaare alajaama näitel mudel. Mudeli eesmärgiks on erineva hajatootjate osakaaluga olukordade simuleerimine valideerimaks pingetundlikkustegurite leidmise meetodeid ning saamaks ülevaadet nende käitumisest pinge muutumisel. Samuti analüüsitakse Sikassaare alajaamas tehtud mõõtmistulemusi ning leitakse mõõdetud tulemuste alusel kahel eri meetodil, vähemruutude meetodil ja logaritmidel, resulteeruvad koormuse pingetundlikkustegurid.</p> <p>PSCAD simulatsioonitulemusi analüüsides selgus, et <math>\cos \varphi</math> režiimis töötavaid hajatootmisseadmeid on võimalik modelleerida konstantse koormusena ning hajatootjate osakaalu suurenedes suureneb võrgu sõlmele mõjuv resulteeruv pingetundlikkus. Koormuse tegelik pingetundlikkus jääb aga samaks. Samuti valideeriti mudeli abil koormuse pingetundlikkuse leidmise meetodit ning tõestati selle töökindlus.</p> <p>Reaalsed mõõtetulemused nii stabiilseid tulemusi ei andnud, kuid sellegipoolest olid kahel erineval meetodil leitud Sikassaare alajaama esimese sektsiooni aktiivkoormuse pingetundlikkuse väärtused lähedased. Reaktiivkoormuse pingetundlikkustegurit ei olnud võimalik reaktiivvõimsuse automaatse kompenseerimise tõttu leida.</p>	
<i>Märksõnad:</i> agregeeritud koormus, hajatootjad, koormusmudel, aktiivkoormuse pingetundlikkus, reaktiivkoormuse pingetundlikkus	

# Summary of the Diploma Work

<i>Author:</i> Pärtel Tani	<i>Type of the work:</i> Master's Thesis
<i>Title:</i> Influence of distributed generation on the aggregated load models of the bus loads	
<i>Date:</i> 25.05.2017	106 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>Faculty:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Tutor(s) of the work:</i> Associate Professor Jako Kilter, PhD student Madis Leinakse	
<i>Consultant(s):</i> PhD student Tanel Sarnet (PSCAD model)	
<p><i>Abstract:</i></p> <p>The main objective of this Master's thesis is to investigate the influence of distributed generation devices on bus loads. To achieve the goal, a theoretical overview of distributed generation devices and more common load models will be presented. Furthermore, Sikassaare substations first section will be modelled in PSCAD. The model is used to validate the methods for finding load voltage dependency factors in a node with distributed generation and to get an overview on the behaviour of bus loads in such nodes in case of a voltage change. Measurements in Sikassaare substation will be analysed and load voltage dependency factors will be found using two methods- least squares method and logarithmic.</p> <p>After conducting simulations in PSCAD model, it was found that distributed generation devices working in <math>\cos \varphi</math> mode can be represented as constant load and while the penetration of distributed generation increases, the bus loads resulting voltage dependency also increases. Also the method for determining load voltage dependency was validated and its accuracy proven.</p> <p>The results based on real measurement were not as stable, but nevertheless the real power voltage dependence factors found using two different methods were similar enough. Reactive power voltage factors could not be found due to automatic regulation of reactive power.</p>	
<i>Keywords:</i> aggregated load, distributed generation, load model, real power voltage dependence, reactive power voltage dependence	

# Sisukord

<b>Lõputöö ülesanne.....</b>	<b>7</b>
<b>Eessõna .....</b>	<b>9</b>
<b>Sissejuhatus.....</b>	<b>10</b>
<b>1. Hajatootmiseseadmete mõju võrgule .....</b>	<b>13</b>
1.1. Üldist.....	13
1.2. Hajatootmiseseadmete tehnoloogiad .....	15
1.2.1. Asünkroongeneraatorid.....	15
1.2.2. Sünkroongeneraatorid.....	19
1.2.3. Hajatootmiseseadmed konverteriga.....	21
1.3. Hajatootmiseseadmete mõju.....	23
1.3.1. Asünkroongeneraatoripõhiste tootmiseseadmete mõju .....	23
1.3.2. Sünkroongeneraatoripõhiste tootmiseseadmete mõju.....	24
1.3.3. Konverterpõhiste tootmiseseadmete mõju.....	25
1.4. Ülepinge.....	27
1.5. Nõuded hajatootmiseseadmetele.....	28
<b>2. Koormuste modelleerimine .....</b>	<b>32</b>
2.1. Staatilised koormusmudelid.....	33
2.1.1. Eksponentmudel.....	34
2.1.2. Polünoom- ehk ZIP-mudel.....	36
2.1.3. Lineaarmudel .....	37
2.1.4. Komposiitmudel.....	38
2.1.5. Asünkroonmootori staatiline mudel.....	39
2.2. Dünaamilised koormusmudelid .....	40
2.2.1. Dünaamiline eksponentmudel.....	41
2.2.2. Asünkroonmootori dünaamiline mudel .....	42
2.2.3. Asünkroonmootori ülekandefunktsiooni mudel.....	43
2.3. Koormusklasside osakaalude määramine Sikassaare alajaamas .....	44
2.4. Resulteeruva pingetundlikkuse leidmine .....	46
2.5. Tootjad .....	47
<b>3. Modelleerimine ja anlüüs programmpaketis PSCAD/EMTDC .....</b>	<b>49</b>
3.1. Katse mudel .....	49
3.2. Simulatsioonid .....	53
3.2.1. Andmete töötlus.....	54
3.2.2. Resulteeruvad aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkustegurid trafofiidris erinevate hajatootjate osakaalude puhul .....	57
3.2.3. Aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkustegurid erineva hajatootmise osakaalu juures leituna tegeliku tarbimise alusel.....	62
3.2.4. Trafole mõjuvate aktiiv- ja reaktiivpingetundlikkuste leidmine sõltuvalt hajatootjate osakaalust võimsusteguriga 0,8 .....	63
3.2.5. Aktiiv- ja reaktiivpingetundlikkuste leidmine tegeliku koormuse alusel sõltuvalt hajatootjate osakaalust võimsusteguriga 0,8.....	66
3.2.6. Trafole mõjuvate aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkuste leidmine erinevate koormusmudeli pingetundlikkuste korral .....	68
3.3. Analüüs .....	71
<b>4. Mõõtmised Sikassaare alajaamas .....</b>	<b>73</b>
4.1. Katse selgitus .....	73

4.2.	Mõõtetulemused.....	73
4.3.	Mõõteandmete töötlemine.....	75
4.3.1	Liikuv keskmine.....	75
4.3.2	Savitzky-Golay filter.....	78
4.4.	Mõõtetulemuste analüüs .....	81
4.5.	Kogukoormuse leidmine .....	82
4.6.	Koormuse pingetundlikkustegurite leidmine .....	83
4.6.1	Vähemruutude meetod .....	84
4.6.2	Logaritmine.....	89
4.7.	Analüüs .....	93
<b>Lõputöö kokkuvõte .....</b>		<b>95</b>
<b>Lisad .....</b>		<b>104</b>
L.1.	Elektrilevi tarbijate tüüpgrupid .....	105
L.2.	PSCAD skeem .....	106

# Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	<b>Hajatootjate mõju elektrivõrgu sõlmekoormuste agregeeritud mudelitele</b>
Üliõpilane:	<b>Pärtel Tani, 153508AAVM</b>
Eriala:	<b>Elektroenergeetika</b>
Lõputöö liik:	<b>Magistritöö</b>
Lõputöö juhendajad:	<b>Dotsent Jako Kilter, doktorant Madis Leinakse</b>
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	<b>25.06.2017</b>
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>25.05.2017</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendajad (allkiri)

---

Instituudi direktor (allkiri)

## Teema põhjendus:

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis on käsil projekt Eesti ülekandevõrgu koormussõlmede staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute uurimiseks. Seoses koormuse struktuuri olulise muutusega viimastel kümnenditel ning hajatootmise suurenemisega on tarvis hetkel kasutusel olevat koormuse mudelit täpsustada.

Antud töös on uurimise suure hajatootjate osakaaluga sõlme koormuse pingetundlikkus ja selle sõltuvus hajatootmise osakaalust.

Tehes selgeks koormuse käitumise erinevates olukordades on elektrisüsteemi talitusparameetreid võimalik adekvaatsemalt leida ning seeläbi võrgu stabiilsust ning efektiivsust paremini tagada.

## Töö eesmärk:

Töö eesmärgiks on uurida hajatootjate mõju agregeeritud sõlmekoormusele Sikassaare piirkonnaalajaama näitel.

## Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Mis tüüpi tarbijad on Sikassaare 110/35/10 kV alajaama toitel ning kuidas neid modelleerida?

Kuidas talitlevad hajatootmisseadmed võrguparameetrite muutuste korral?

Uuritava võrguosa piiritlemine ning vastava PSCAD mudeli koostamine

Missugune on hajatootjate mõju sõlmekoormuse pingetundlikkusele lähtudes koostatud PSCAD mudelist?

**Lähteandmed:**

Andmeid saadakse Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudist ning Elektrilevi OÜ-st.

**Lõputöö konsultandid (vajadusel):**

---

Konsultant nimi (allkiri, kuupäev)



## Eessõna

Lõputöö teemal „Hajatootjate mõju elektrivõrgu sõlmekoormuste agregeeritud mudelitele“ oli välja pakutud Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi poolt. Autori jaoks osutus antud teema sobivaks seoses töökohaga Elektrilevis, mille kaudu oli lihtsamini võimalik läbi viia mõõtmised Sikassaare alajaama Elektrilevi 10 kV seadmes ning saada andmeid antud alajaama toitel oleva võrgu kohta.

Lõputöö valmis tänu teema välja pakkunud ja töö käigus nõu andnud ja suunanud juhendajate Jako Kilteri ja Madis Leinakse abile. Samuti aitas töö valmimisele nõuannetega PSCAD-i mudeli loomisel kaasa Tanel Sarnet. Mõõtmiste õnnestumise eest Sikassaare alajaamas tuleb tänada varasemalt sarnaste mõõtmistega põhivõrgus kokku puutunud Uku Salumäed ja Elektrilevi automaatikuid, kes aitasid mõõteseadme ülespanekuga ning seadistamisega.

Kontakt: parteltani@gmail.com

Alaline elukoht: Lastekodu 15-12, Tallinn

Töökoht: Elektrilevi OÜ juhtimiskeskus, Kadaka tee 42J

# Sissejuhatus

Tänapäeval majanduslikust seisukohast lähtudes stabiilsuspiiri lähistel töötavate elektrivõrkude töökindluse tagamiseks tuleb kõigi võrguelementide täpsele modelleerimisele suurt tähelepanu pöörata. Varasemalt on põhjalikult uuritud generaatorite ja ülekandevõrgu seadmete mõju süsteemi stabiilsusele, jättes koormuse mõju uurimise pisut tagaplaanile, olgugi, et korrektne koormuse modelleerimine on võrgu stabiilsusarvutuste seisukohalt äärmiselt suure tähtsusega.

Koormuse modelleerimiseks on välja töötatud erineva täpsusega ning erinevatesse olukordadesse sobivaid koormusmodelid. Neid koormusmudeleid jaotatakse peamiselt staatilisteks ja dünaamilisteks. Staatilised koormusmodelid sobivad koormuste modelleerimiseks püsiolekorras peale sageduse või pinge väiksemat muutumist. Staatilised koormusmodelid kirjeldavad algebralise funktsioonina aktiiv- ja reaktiivvõimsuse sõltuvust pingest ja sagedusest.

Dünaamiilised koormusmodelid sõltuvad ajast ja neid kasutatakse süsteemi dünaamika uurimisel ehk uuritakse süsteemi käitumist peale suuremaid häiringuid, mil on oluline ka siirdeprotsess kuidas süsteem ühest olekust teise liigub. Dünaamilisi koormusmudeleid kirjeldavad diferentsiaalvõrrandid.

Koormusmodelite loomiseks on kaks lähenemisviisi- komponendipõhine ja mõõtmispõhine. Kui esimesel juhul on vaja teada sõlmekoormuse komponente, nende osakaalusid ning parameetreid, siis teisel juhul määratakse koormusmodeli parameetrid mõõtmiste alusel katseliselt. Mõõtmispõhine lähenemisviis on küll enamasti täpsem, kui igas olukorras seda kasutada ei ole võimalik. Mõõtmispõhist lähenemisviisi saab kasutada peamiselt staatiliste koormusmodelite korral, kuna ei ole mõeldav suurte häiringute tekitamine võrgus dünaamiliste koormusmodelite parameetrite leidmiseks.

Varasem võrgu ülesehitus, kus elektrienergia toodeti suurtes elektrijaamades ja sealt tarbijateni ülekandeliine kasutades transporditi, on muutumas. Järjest kiiremas tempos lisandub elektrivõrkudesse hajatootjaid. See esitab võrgule aga uusi väljakutseid. Käesolevas töös uuritaksegi, kuidas mõjuvad hajatootjad sõlmekoormusele. Mõju uurimine teostatakse suure hajatootjatega Sikassaare alajaama näitel nii teoreetiliselt, modelleerides seda tarkvaras PSCAD, kui ka praktiliselt reaalseid mõõtmised antud alajaamas läbi viies.

Töö eesmärgiks on PSCAD-is Sikassaare alajaama modelleerides tuvastada hajatootjate mõju sõlmekoormusele pinge muutudes ning valideerida mõõteandmete põhjal koormusmudeli pingetundlikkust kirjeldavate tegurite  $k_{pu}$  ja  $k_{qu}$  leidmise meetoodika. Mudelis katsetatud meetoodikat rakendatakse seejärel reaalsele mõõtmistulemustele ning leitakse Sikassaare alajaama esimese sektsiooni aktiivkoormuse pingetundlikkusteguri väärtus.

Käesolev töö on jaotatud neljaks peatükiks, kus esimeses kahes antakse teoreetiline ülevaade hajatootmiseseadmete põhilistest tehnoloogiatest, nende mõjust võrgule ning erinevatest kasutusel olevatest koormuse mudelitest.

Esimeses peatükis keskendutakse peamiselt tootmiseseadmete tehnoloogiatele ning antakse ülevaade erinevat tüüpi tehnoloogiaga hajatootmiseseadmete mõjust võrgule. Samuti kirjeldatakse ülevaatlilikult, missugused nõuded on Eestis kehtestatud tootmiseseadmete ühendamisel põhi- ja jaotusvõrguga.

Teises peatükis keskendutakse koormuse mudelitele. Antakse ülevaade koormusmudelite jaotamise põhimõtetest ning selgitatakse kasutusel olevate levinumate staatiliste ja dünaamiliste koormusmudelite sisu. Peale koormusmudelite tutvustamist leitakse tarbijate tüüpgruppide varasemate tarbimisandmete põhjal nende osakaalud Sikassaare alajaamas. Tüüpgruppide osakaalude ja kirjanduses toodud tüüpgruppide pingetundlikkustegurite põhjal leitakse Sikassaare alajaama summaarsed koormuse eksponentmudeli pingetundlikkustegurid. Saadud suurusid kasutatakse järgmise peatüki mudelis.

Kolmandas peatükis koostatakse PSCAD tarkvaras suure hajatootjate osakaaluga Sikassaare 110/35/10 kV alajaama esimese sektsiooni mudel, selgitatakse mudelis olevaid elemente ning nende tööpõhimõtteid. Seejärel antakse edasi tehtavate simulatsioonide üldised põhimõtted, peale mida võetakse detailselt ette iga tehtud simulatsioon eraldi.

Esmalt uuritakse kuidas mõjub trafo koormuse pingetundlikkusele  $\cos \varphi$  režiimis võimsusteguriga 1 töötavate hajatootjate osakaalu suurenemine. Teise simulatsioonina uuritakse samas režiimis töötavate hajatootjate mõju kogukoormusele. Kolmandas simulatsioonis muudetakse hajatootjate võimsustegurit ja võrreldakse tulemusi esimeses punktis saadutega. Neljas ja viimane simulatsioon hõlmab endas resulteeruva pingetundlikkuse leidmist erinevate koormuse pingetundlikkuste korral. Aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkustegureid muudetakse piirides  $-5 \dots 5$ , mis on ka PSCAD-is suurim võimalik vahemik. Peatüki lõpus võetakse saadud tulemused kokku ning antakse nende ootuspärasusele hinnang.

Neljandas peatükis antakse ülevaade Sikassaare alajaama esimeses sektsioonis koormuse pingetundlikkuse määramiseks tehtud reaalsete mõõtmiste tulemustest. Esmalt selgitatakse katse ülesehitust ning detaile. Seejärel vahetult peale esmaste tulemuste esitamist antakse ülevaade mõõtmistulemuste analüüsiks kasutatavatest meetoditest. Järgmiseks leitakse neljanda peatüki põhilise väljundina Sikassaare alajaama aktiivkoormuse pingetundlikkustegur kahel meetodil- vähemruutude meetodil ja logaritmidel. Peatüki lõpus võetakse saadud tulemused kokku ning antakse hinnang tulemustele ning nende realistlikkusele. Samuti võrreldakse koormuse pingetundlikkusteguri leidmist simulatsioonis selle leidmisega reaalsete mõõtmiste alusel.

Käesolevas töös saadud tulemusi ning kasutatud meetodeid on võimalik ka teiste hajatootjatega alajaamade koormuse pingetundlikkustegurite leidmise juures kasutada. Samuti on võimalik antud töös koormuse eksponentmudeli pingetundlikkustegurite leidmiseks kasutatavat meetodikat ka teiste koormusmudelite jaoks laiendada.

Antud töö tulemused võivad olla töö kirjutamise ajal käimas oleva Eleringi ja Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi vahelise koormuste projekti või mõne teise koormuse käitumist uuriva töö üheks sisendiks.



üldjuhul vähendab võimsuskadusid, samas kui nende osakaal suureneb üle kriitilise piiri, hakkavad võimsuskadod suurenema. [3]

Hajatootmiseseadmed võivad endaga kaasa tuua võrgu töökindluse suurenemist, elektrikvaliteedi paranemist ning ülekandevõrkudes ka stabiilsuspiiri suurenemist kui hajatootjaid kaalutledes ja strateegiliselt võrku integreerida. Siiski ei pruugi see nii igas olukorras toimida, kuna palju sõltub ka sõlme koormusstruktuurist. Võimalikku võrgu töökindluse suurenemist võetakse hajatootmiseseadmete installeerimisel siiski harva arvesse. [4]

Selleks, et hajatootmise osakaalu koormussõlmes iseloomustada on kasutusel protsentuaalne indeks. Hajatootjate osakaal sõlmes  $\%P_g$  leitakse valemiga (1.1): [1]

$$\%P_g = \frac{\sum P_{dg}}{\sum P_L} \cdot 100 \quad (1.1)$$

Kus  $\sum P_{dg}$  – hajatootjate poolt genereeritav summaarne aktiivvõimsus,

$\sum P_L$  – summaarne tarbitav aktiivvõimsus

Võrdlemaks sõlmede pingeid erinevate hajatootjate osakaalude korral on välja töötatud pingeprofiiliindeks VPI, mis näitab kui lähedal on sõlme pinged oma standardi poolt ettenähtud väärtusele. Mida suurem on VPI väärtus, seda lähemal on sõlme pinged ettenähtud väärtustele.

VPI väärtust arvutatakse kasutades valemit 1.2: [5]

$$VPI = \log_{10} \left( k \times \left| \frac{1}{V_\mu - 1} \right| \right) \quad (1.2)$$

$V_\mu$  ja  $k$  leitakse järgmiste seoste abil:

$$V_\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n V_i \quad (1.3)$$

ja

$$k = 1 - V_\sigma \quad (1.4)$$

ning

$$V_{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (V_i - V_{\mu})^2} \quad (1.5)$$

kus:  $N$ - sõlmede arv võrgus,

$V_i$ -pinge sõlmes  $i$ ,

$V_{\mu}$ -keskmise sõlmepinge vaadeldavas võrgus,

$V_{\sigma}$ -sõlmepingete standardhälve.

Ulatus, mis määral hajatootjad võimsuskadusid ja pingeprofiili mõjutavad sõltub hajatootjate tüübist, pingeastmest, nende summaarsest aktiiv- ja reaktiivvõimsusest ja sõlmest, kuhu nad ühendatud on. Suurema pingeastmega võrkudesse on võimalik ilma võimsuskadusid suurendamata või pingeprofiili halvendamata ühendada rohkem hajatootmisseadmeid kui väiksema pingeastmega võrkudesse. [1, 4]

Vastavalt kasutatud tehnoloogiale jaotatakse hajatootjad tavaliselt asünkroon- ja sünkroongeneraatoripõhisteks ning tootjateks, kes on võrku ühendatud läbi konverteri. Olenevalt kasutatud tehnoloogiast käituvad eelpoolmainitud tootjad võrguhäiringu korral erinevalt. Kõrgepingevõrkudes aitavad asünkroon- ja sünkroongeneraatoripõhised hajatootmisseadmed pingelohu sügavust efektiivsemalt vähendada kui konverterpõhised, mille mõju kõrgepingevõrkudes on tühine. Madalpingevõrkudes seevastu omavad ka konverterpõhised hajatootmisseadmed pingelohu sügavusele märkimisväärset mõju. [4, 5]

## 1.2. Hajatootmisseadmete tehnoloogiad

### 1.2.1. Asünkroongeneraatorid

Tänu oma lihtsusele, odavusel ning töökindlusele on asünkroonmasinad äärmiselt levinud. Neid jaotatakse vastavalt rootori ehitusele lühisrootoriga (*squirrel cage induction machine*) ning faasirootoriga asünkroonmasinateks (*doubly-fed induction machine*).

Asünkroonmootorites indutseerib staatori pöörlev magnetväli rootori mähises voolu. Vool rootoris aga seisab vastu oma tekke põhjusele tekitades sellega ning pannes rootori pöörlema kiirusega, mis on lähedane staatori magnetväljale. Kui rootori kiirus on aga suurem staatori magnetvälja kiirusest, siis töötab masin generaatorrežiimis ning toodab elektrienergiat. Kui

aga rootori kiirus on staatori magnetvälja pöörlemiskiirusest väiksem, siis töötab masin mootorirežiimis ning tarbib elektrienergiat. [6, 7]

Staatori magnetvälja pöörlemiskiirus sõltub sagedusest ja pooluspaaride arvust. Rootori pöörlemiskiirus erineb staatori magnetvälja pöörlemiskiirusest libistuse  $s$  võrra. Libistuse väärtus sõltub mootori momendist ja moodustab sellest mõne protsendi. [6, 8]

Asünkroonmasina karakteristikud sõltuvad selle ehitusest. Selleks, et masina kasutegur oleks võimalikult suur, peab selle takistus olema võimalikult väike. Väike takistus põhjustab aga suuri käivitusvoole, mis mõjuvad võrgule halvasti põhjustades pingelohke. Üldiselt kasutatakse kolme tüüpi käivitamist: otsekäivõtmine, sujuvkäivõtmine ning sagedusjuhtimisega käivõtmine. Otsekäivõtmine on kõige lihtsam- masin lülitatakse tavaliselt kontaktoreid kasutades võrku. Sel juhul on käivitusvoolud suurimad. [6, 9]

Sujuvkäivitusega on võimalik masinaid väiksemate käivitusvooludega võrku ühendada. See saavutatakse tavaliselt kas toitepinge täht/kolmnurk ümberlülitamise teel vähendades sellega käivitusvoolu ja -pinget või rootori takistuse muutmise teel. Faasirootoriga asünkroonmasina puhul on erinevalt lühisrootoriga asünkroonmasinast võimalik rootori takistust muuta. Mootor käivitatakse suurema takistusega, et piirata käivitusvoole ning normaalses tööolukorras töötab see väikese takistusega, et masina efektiivsus oleks võimalikult suur. Lisaks varem mainitud meetoditel kasutatakse sujuvkäivitamisel ka autotrafoga käivitamist ja käivitamist läbi reaktori. [6, 9]

Sagedusjuhtimisega käivitamisel on peamiseks eeliseks see, et on võimalik sagedust tõsta sujuvalt nimiväärtuseni. Samuti on ka teistes režiimides võimalik masina kiirust juhtida. Kõige laialdasemalt on kasutusel pulsilaiusmodulatsiooniga juhitava vaheldiga sagedusjuhtimine. Sagedusjuhtimise peamiseks kitsaskohaks on sagedusmuundurite suur maksumus.

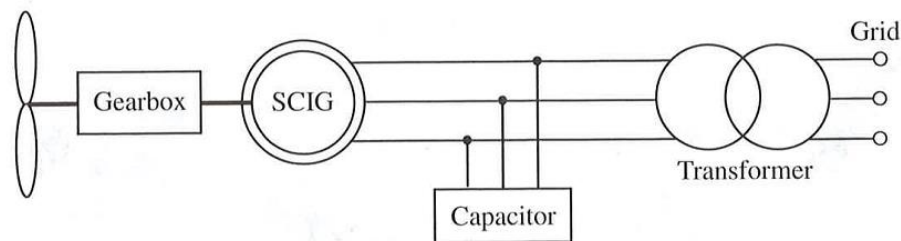
Tuuleenergeetikas kasutatakse fikseeritud kiirusega turbiinide juures peamiselt lühisrootoriga asünkroongeneraatorit ja mitmeastmelist käigukasti. Antud tehnoloogia levis laialdaselt peamiselt 1980. ja 1990.-ndatel. Alates 1990. aastate lõpust, mil tuulikute võimsus tõusis 1,5MW-ni ja kõrgemale, hakati järjest rohkem kasutama muudetava kiirusega turbiine, mis mõjuvad võrgu pingekvaliteedile oluliselt paremini. Muudetava kiirusega turbiinide juures kasutatakse enamasti faasirootoriga asünkroongeneraatoreid koos mitme astmelise käigukasti ning jõuelektronikal põhinevate konverteritega. Järjest rohkem kasutatakse tuuleenergeetikas ka püsomagnetitel põhinevaid sünkroongeneraatoreid, kuna nende puhul on oluliselt vähem



käigukastiga seotud rikkeid ning hooldusega seotud probleeme on oluliselt vähem. Sünkroonmasinatest tuleb detailsemalt juttu järgmises punktis. [10]

- **Lühisrootoriga asünkroongeneraatorid**

Lühisrootoriga asünkroonmasinat kasutatakse enamasti mootorina, kuid kui välise jõumasina abil rootori kiirus üle sünkroonkiiruse tõsta hakkab asünkroonmasin tööle generaatorina. Lühisrootoriga asünkroongeneraatorid on tuuleenergeetikas laialdaselt levinud tänu oma väiksele maksumusele ning väikesele suurusele, heale vastupidavusele, harjade puudumisele, hoolduse lihtsusele ning iseeneslikule kaitsele suurte ülekoormuste ja lühiste vastu. Samuti ei vaja nad eraldi alalisvoolu ergutust. Lühisrootoriga asünkroongeneraatori põhimõtteskeem on toodud joonisel 1.1. [8, 10]



**Joonis 1.1. Lühisrootoriga asünkroongeneraatoril põhineva tuuliku põhimõtteskeem [10]**

Lühisrootoriga asünkroongeneraator toodab aktiivvõimsust, kuid vajab ergutuseks ja magnetvälja tekitamiseks reaktiivvõimsust. Selle tulemusena on seda tüüpi generaatoritel madal võimsustegur, mis ei ole võrgu seisukohast tihtipeale soovitav. Seetõttu lisatakse lühisrootoriga asünkroongeneraatorite juurde enamasti reaktiivenergia tootmiseks kondensaatorpatarei, mis kompenseeriks asünkroonmootori poolt tarbitavat reaktiivvõimsust seda kohapeal tootes.

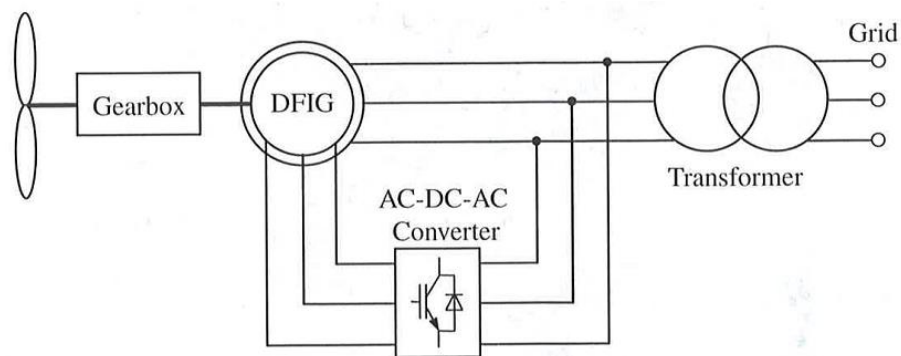
Lühisrootoriga asünkroongeneraatori ühendamisel võrku, eriti suure võimsusega generaatori, põhjustab tihtipeale suuri löökvoole, mille väärtus ulatub 7...8 kordse mootori nimivooluni. Seetõttu võivad lühisrootoriga asünkroongeneraatori otse võrku ühendamisel tekkida võrgus pingelohud. [7, 10]

Kasutatakse enamasti kahe või kolme pooluspaariga generaatoreid, mis tähendab, et nende sünkroonkiirus on 50 Hz süsteemis vastavalt 1500 või 1000 pööret minutis. Selle tulemusel on jõuülekandesse vajalik käigukast, et tõsta väiksema kiirusega pöörlev turbiini kiirus asünkroongeneraatori jaoks 1000 või 1500 pööret/min juurde. Käigukast aga vähendab lahenduse efektiivsust ning suurendab selle kaalu, investeeringut ning hoolduskulusid.

Olgugi, et lühisrootoriga asünkroongeneraatorite kasutamisel on varasemalt mainitud selgeid eeliseid nagu väike maksumus, lihtsus ja töökindlus, on neil siiski ka olulisi puudusi. Nimelt ei ole kiiruste vahemik, milles generaator töötab, kontrollitav ning on äärmiselt kitsas, kuna generaatori rootorimähis ei ole ligipääsetav ja seetõttu ei ole võimalik selle takistust muuta. Sellest lähtuvalt ei ole maksimaalset võimalikku efektiivsust tootmisel alati võimalik saavutada. Tõenäoliselt suurim puudus on siiski reaktiivenergia suur tarbimine võrgust, mistõttu antud tüüpi generaator omab negatiivset mõju võrgu pingele.

- **Faasirootoriga asünkroongeneraatorid**

Faasirootoriga asünkroongeneraatori puhul on erinevalt lühisrootoriga asünkroongeneraatorist rootori mähis kontaktrõngaste (*slip ring*) abil välja toodud. Kuna rootorimähis on ligipääsetav, siis võimaldab see ka tootmise jaoks efektiivset kiiruste vahemikku suurendada. Rotoriahel on enamasti ühendatud jõuelektroonikal põhineva konverteriga, mis koosneb rootoripoolsest ja võrgupoolsest konverterist, mida ühendab ühine alalisvooluahel. Seeläbi saab rootori mehaanilise kiiruse ja võrgu elektrilise kiiruse vahe kompenseerida lisades muudetava sagedusega voolu rootorisse. Seetõttu saab generaatori toimimist nii normaalolukorras kui ka rikke olukorras konverterite juhtimisega kontrollida. Faasirootoriga asünkroongeneraatori põhimõtteskeem on toodud joonisel 1.2



**Joonis 1.2. Faasirootoriga asünkroongeneraatoril põhineva tuuliku põhimõtteskeem [10]**

Faasirootoriga asünkroongeneraatori ergutus käib läbi rootorimähise erinevalt lühisrootoriga asünkroongeneraatorist, kus see käib läbi staatorimähise. Ergutuseks vajaliku reaktiivenergia võib toota konverter, mistõttu täiendavat reaktiivenergiat võrgust vaja ei lähe ning vajadusel saab seda tüüpi generaatoriga tuulik probleemideta osa võtta võrgu pingereguleerimisest.

Faasirooriga asünkroongeneraatori staator annab võrku alati aktiivenergiat. Rootoris aga võib võimsus liikuda olenevalt olukorrast mõlemat pidi, võrgust rootorisse või rootorist võrku. Kaod kõrvale jättes on võimsus rootorimähises: [10]

$$P_{rootor} = -s \cdot P_{staator} \quad (1.6)$$

Ning võrku toodetav võimsus on: [10]

$$P_{võrku} = P_{rootor} + P_{staator} = (1 - s)P_{staator} \quad (1.7)$$

Kuna enamik energiat läheb läbi staatorimähise, siis rootorimähisest läbi minevat energiakogust on võimalik vähendada umbes 30%-ni. Tänu sellele saavutatakse suhteliselt madalate kuludega piisav kiiruste vahemik, milles generaator on võimeline efektiivselt töötama.

Faasirooriga asünkroonmasinad suudavad töötada kiiruste vahemikus  $\pm 30\%$  sünkroonkiirusest, erinevalt lühisrootoriga masinatest, kus antud vahemik oli paari protsendi juures. Kiiruste vahemik, milles faasirooriga asünkroongeneraator töötada suudab sõltub tema konverterist ja selle võimusest.

Faasirooriga asünkroongeneraatoril põhinevatel hajatootmisseadmetel on olulisi eeliseid nagu kiiruste vahemik, milles nad on võimelised töötama ning oluliselt positiivsem mõju võrgule võrreldes lühisrootoriga asünkroongeneraatoritega, kuna võrku ühendamisel ei teki nii suuri voolusid ning võrgust ei ole normaalrežiimis vajalik reaktiivvõimust tarbida. Sellegipoolest on neil ka olulisi puudusi. Suurimaks neist on suur tundlikkus pingemuutustele, eriti pingelohkudele. Järsud pingelohud generaatori klemmidel põhjustavad suuri pingemuutusi rootoris, mis omakorda võivad muuta rootori voolu kontrollimise võimatuks ning kahjustada rootoripoolset konverterit. [10]

### **1.2.2. Sünkroongeneraatorid**

Sünkroongeneraatorid on peamine allikas, mille abil toodetakse enamik energiasüsteemide elektrienergiast.

Sünkroonmasina staator on samasuguse ehitusega nagu asünkroonmasinalgi ning see tekitab sarnaselt asünkroonmasinale pöörleva magnetvälja. Sünkroonmasina staator on kolme- või üldjuhul m-faasiline ja rootoriga võrdse pooluste arvuga. Staatormähis nimetatakse mõnikord ka ankrumähiseks ja mähist koos südamikuga ankruks. [7, 8]

Sünkroonmasina rootoril on ergutusmähis, mida toidetakse kahe kontaktrõnga ja harjade kaudu välisest alalisvooluallikast, millega tekitatakse rootorisse magnetvoog (ergutusvoog), mis aheldub magnetahela kaudu staatorimähise magnetvooga. Vooluallikana kasutatakse enamasti alalisvoolugeneraatorit, mida nimetatakse ergutiks, mis on väikese võimsusega üldjuhul umbes 0,3...3,0% sünkroonmasina võimsusest ja mis asub tavaliselt sünkroonmasinaga samal võllil. Ergutusmähise ülesandeks on masinas primaarvälja tekitamine. [7, 8]

Kui ergutusvooluga  $I_f$  ergutatud sünkroonmasina rootor pöörleb kiirusega  $n$ , siis ergutusvoog  $\Phi_f$  staatorimähisesse aheldades indutseerib staatorisse elektromotoorjõu  $E_{FD}$ , sagedusega [8, 11]

$$f_1 = \frac{pn}{60} \quad (1.8)$$

Kus  $p$ -sünkroonmasina pooluste arv,  $n$ -pöörlemiskiirus, p/min.

Sellisel juhul töötab masin generaatori režiimis. Staatori ja rootoriväljade pöörlemiskiirused seejuures on võrdsed, moodustades nagu asünkroonmasinategi puhul ühtse resulteeruva magnetvälja. Sünkroonmasin töötab mootorina kui staatorimähist toita võrgust kolmefaasilise vooluga. [8]

Konstruksiooni järgi jaotatakse sünkroonmasinaid välje- ja peitpoolustega masinateks. Väljepoolustega sünkroonmasinad on paljupooluselised ( $2p \geq 4$ ) ning varustatud väljaulatuvate poolustega. Seda tüüpi sünkroonmasin võib töötada ka ergutusväljata, mis juhul kutsutakse seda reluktantsmasinaks. Reluktantsmootori töö põhineb reluktantsi ehk õhupilu magnetilise takistuse muutumisel sõltuvalt rootori asendist. Väljepoolustega sünkroonmasinate eriliigiks on vertikaalsed hüdrogeneraatorid, mille vertikaalne võll ühendatakse vahetult hüdroturbiiniga. [7, 8]

Peitpoolustega sünkroonmasinal on silindrikujuline rootor, millesse freesitakse ergutusmähise paigaldamiseks uurred. Peitpoolustega sünkroonmasinaid valmistatakse pooluste arvuga kaks ja neli, mis tähendab, et need on suure pöörlemiskiirusega. 50 Hz süsteemis vastavalt 3000 ja 1500 p/min. Seda tüüpi sünkroonmasinate levinuimaks esindajaks on turbogeneraatorid. [8]

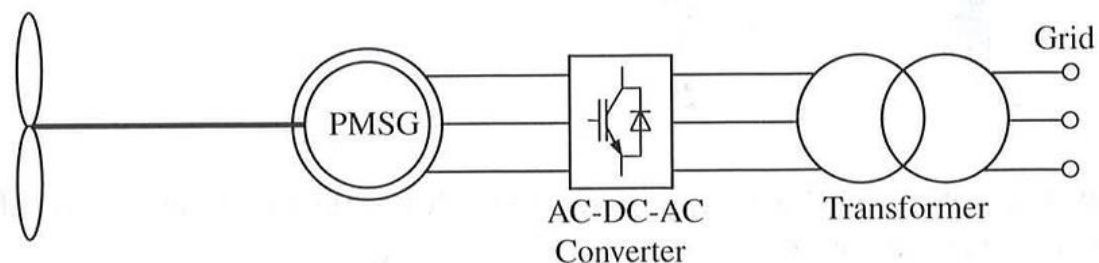
- **Püsimagnet-sünkroongeneraator**

Püsimagnetiga sünkroonmasinatel ei ole ergutusmähist ja nagu nimigi ütleb kasutatakse seda tüüpi generaatoris magnetvoo, mille abil elektrienergiat toota, tekitamiseks püsimagnetit.

Tänu püsिमagnetil olemasolule ergutuseks ei ole vajalik enam väline toide ning samuti pole vaja rootorimähist. Kõik see lihtsustab masina struktuuri, hooldust ja maksumust ning suurendab töökindlust, mistõttu kasutatakse seda tihti muutuva kiirusega ajamites. Püsिमagnetil põhinevad sünkroongeneraatorid on efektiivsemad kui asünkroongeneraatorid ning nende võimsustegur võib olla üks või isegi ühest suurem, ehk nad võivad ka reaktiivenergiat toota. Samuti on nendes väga suur energiatihedus ning nad on muutumas järjest kuluefektiivsemaks, kuna püsिमagnetite hinnad on viimase kümnendi jooksul oluliselt vähenenud. Neil põhjustel on seda tüüpi generaatorid tuuleenergeetikas järjest populaarsemaks muutumas. Püsिमagnetiga sünkroongeneraatori põhimõtteskeem on toodud joonisel 1.3 [7, 10]

Sünkroongeneraator töötab sünkroonkiirusel, mis tähendab, et libistus on 0 ning antud tüüpi generaatori poolt toodetud energia on proportsionaalne selle mehaanilise kiirusega.

Püsिमagnet-sünkroongeneraatoreid kasutatakse hajaenergeetikas enamasti muudetava kiirusega tuuleturbiinides, kus rootori ja tuuliku turbiini vahel on võll ühendatud jäigalt ning nad pöörlevad sama kiirusega. Enamasti kasutatakse *full scale back-to-back* konvertereid AC-DC-AC muundamiseks, samas on võimalik kasutada ka dioodalaldit alalisvoolulungi ning inverteriga. [3, 10]



**Joonis 1.3. Püsिमagnetiga sünkroongeneraatoril põhineva tuuliku põhimõtteskeem [10]**

Kuna kasutusel on püsिमagnetid, siis tuleb olla ettevaatlik, et voolud ja temperatuurid ei kerkiks üle lubatava taseme vältimaks püsिमagnetite demagnetiseerumist.

### 1.2.3. Hajatootmisseadmed konverteriga

Olenevalt oma kasutusest võrgus jagatakse konvertereid võrku toitvateks (*grid-feeding*), võrku toetavateks (*grid-supporting*) ja võrku moodustavateks (*grid-forming*). [12, 13]

Võrku moodustavaid konvertereid saab kujutada ideaalse vahelduvpinge allikana koos madala väljundimpedansiga. Võrku moodustav konverter määrab kohaliku võrgu pinge amplituudi ja

sageduse. Teiste sama tüüpi konverteritega paralleeltöö tagamiseks on äärmiselt tähtis nendevaheline täpne sünkroniseerimine. Kõige ilmekam näide võrku moodustavast konverterist on katkematu toite allikas (*uninterruptible power supply- UPS*), mis normaalolukorras töös ei ole, kuid võrguparameetrite langemisel alla ettenähtud väärtuse tekitab võrgupinge ise. [13]

Võrku toitvad konverterid on loodud juba toimivasse võrku võimsust tootma. Neid võib kujutada ideaalse vooluallikana, mis on paralleelselt ühendatud suure impedansiga. Sellise lahenduse korral on äärmiselt tähtis, et antud vooluallikas oleks ülejäänud võrguga ideaalselt sünkroniseeritud, et tagada aktiiv- ja reaktiivvõimsuse täpset reguleerimist. Samuti suudavad nad sellisel juhul efektiivselt teiste võrku toitvate konverteritega koos töötada. Enamik hajatootmisseadmeid töötavadki võrku toitvas režiimis. Võrku toitev konverter vajab toimimiseks seadet, mis hoiaks võrgupinget. Seetõttu ei saa seda tüüpi konverter töötada iseseisvalt saartalitusel. [13]

Võrku toetavaid konvertereid võib kujutada kas ideaalse vahelduvvoolu kontrollitud vooluallikana, mis on paralleelselt šunteeriva impedansiga või ideaalse vahelduvvoolu pingevallikana jadamisi ühendusimpedansiga (*link impedance*). Seda tüüpi konverterid reguleerivad oma väljundvoolu/pinget, selleks et hoida võrgusageduse ja pinge väärtust nominaalsete väärtuste juures. Sageduse reguleerimine on mõeldav muidugi ainult eraldiseisva süsteemina töötades, näiteks saartalitusel, kus võrgupinge loob võrku moodustav konverter ja seda aitab õigel tasemel hoida võrku toetav konverter. [13]

Võrgu pinge hetkväärtuste parameetrite võimalikult täpsel estimateerimisel on tugev mõju võrku ühendatud konverterite üldisele tööle. Täpne sünkronisatsiooni algoritm on vajalik estimateerimaks võrgupinge parameetreid nagu amplituud, sagedus ja faasinurk, kuna need suurused on olulised aktiiv- ja reaktiivvõimsuse kontrolli täpseks läbiviimiseks. Võrguparameetrite täpne monitooring on tähtis veel kõige sobivama talitlusviisi määramiseks.

Faasilukk tehnoloogia (*phase-locked loop*) on laialdaselt kasutusel sünkroniseerimaks konvertereid võrgupingega. Kolmefaasilistes süsteemides on laialdaselt kasutusel sünkroonse taustsüsteemiga faasikuku tehnoloogia (*synchronous reference frame phase-locked loop*). See on küll võrgu normaalolukorras efektiivne, kuid kui sisendsignaal on moonutatud või ebahülglane, siis on ka antud tehnoloogia toimimine ebaefektiivne. [13]

### **1.3. Hajatootmisseadmete mõju**

Põhiline ja sagedaseim kõrvalekalle normaaltalitusest on pingelohk, mis võib olla põhjustatud lühistest, mootorite käivitamisest ja trafode magneetimisest. Enamik pingelohkusi on olemuselt kas lühikesed ja sügavad või pikad ning väikese amplituudiga, nagu selgus põhjaliku pingelohkude uuringu diagrammilt. [5, 9]

Kuna hajatootmisseadmed ei vähenda võrku antavat võimsust pingelohu korral kuid samas väheneb võrgus tarbitav võimsus seoses pinge langusega, siis muutuvad ka võimusuhood võrgus. See võib mõningatel juhtudel põhjustada isegi pingetõusu hajatootmisseadmete lähedal.

Pingelohkude korral aitavad kõrgepingevõrkudes sünkroon- ja asünkroongeneraatoritega hajatootjad pingelohu sügavust vähendada. Konverterpõhiste tootmisseadmete mõju kõrgepingevõrkudes pingelohkude sügavusele leiti allikate [14] ja [15] kohaselt olevat tühine. Nende väike mõju on tingitud sellest, et konverterpõhised tootjad töötavad võimsusteguri 1 lähedal ning pingelohu korral võrku antav võimsus on piiratud konverteri nominaalse vooluga. Kui konverterpõhised tootjad annaks pingelohu korral võrku arvestatavas koguses reaktiivvoolu, siis aitaksid need pingelohu sügavust kõrgepingevõrkudes vähendada. [4]

Reaktiivenergia tootmine pingelohu korral aga ei oma nii suurt mõju madalpingevõrkudes, kuna pinge hajatootjaga madalpingefiidri sõlmedes sõltub peamiselt võrku antavast aktiivenergiast. Seetõttu võib tekkida ka sõlme jaoks liiga suure võimsusega tootja korral probleeme liigpingega, mil ka normaaltalitluses võib jaotusvõrgu madalpingesse ühendatud generaatori korral pinge üle lubatavate piiride tõusta. Konverterpõhiste tootjate mõju pinge anormaalsuse korral on tugevalt sõltuv võrgu pingest ja võrgu impedantsist. [4, 16]

Mida suurem on pingestate seda rohkem võib kadusid suurendamata hajatootjaid võrku ühendada. [5]

#### **1.3.1. Asünkroongeneraatoripõhiste tootmisseadmete mõju**

Asünkroongeneraatorite poolt toodetav aktiivvõimsus on võrdeline selle klemmipinge ruuduga. Pingelohu korral kui pinge langeb väheneb ka asünkroongeneraatorite toodetav energia võrdeliselt pingelohu sügavuse ruuduga.

Vähese osakaaluga asünkroongeneraatorite ühendamisel keskpingevõrku omavad need positiivset mõju võrgule vähendades võimsuskadusid võrgus. Kui aga

asünkroongeneraatoriga hajatootjate osakaal võrgus suureneb, hakkavad ka aktiiv- ja reaktiivvõimsuskad võrgus kasvama. Osakaal, mille korral aktiiv- ja reaktiivvõimsuskad on vähimad sõltub aga sõlmest. Allikas [5] leiti, et 13,8 kV võrgus on aktiivvõimsuskad minimaalsed osakaalu juures 25-50% ja 69 kV võrgus osakaalu 50-75% juures. Vähimad reaktiivvõimsuskad esinesid 13,8 ja 69 kV võrkudes vastavalt hajatootmise osakaalu 30-50% ja 60-80% juures.

Asünkroongeneraatoritel põhinevate hajatootmiseseadmete osakaalu suurendamisel ülekandevõrkudes vähenevad pinged võrgu sõlmedes normaalolukorras allika [1] kohaselt võrreldes juhuga, mil neid ühendatud ei ole. See on tingitud sellest, et suurendades asünkroongeneraatorite osakaalu suureneb nende poolt tarbitav reaktiivvõimsus, mis suurendab reaktiivvõimsusvoogusid võrgus, mis omakorda suurendab võimsuskadusid ning pinge liini lõpus sellest lähtuvalt omakorda väheneb. Kui kogu tarbitav reaktiivvõimsus aga kohapeal toota, siis lisataval asünkroongeneraatoritel enam nii suurt mõju võrgule pole. Ka allika [5] kohaselt punktis 1.1 toodud pingeprofiili indeksi alusel asünkroongeneraatorid pingeväärtuse olulisele paranemisele kaasa ei aita.

### **1.3.2. Sünkroongeneraatoripõhiste tootmiseseadmete mõju**

Sünkroongeneraatorid on võimelised ergutust muutes pinget oma klemmidel ühtlasena hoidma reguleerides sellega toodetavat reaktiivvõimsust, st. nad on võimelised töötama erinevate võimsusteguritega. Sünkroongeneraatoreid võib modelleerida konstantse (klemmi)pingena, mille juures on teada aktiivvõimsuse genereerimine ja reaktiivvõimsuse limiidid. [5]

Sünkroongeneraatoritel on sarnased aktiiv- ja reaktiivvõimsuse karakteristikud nagu asünkroongeneraatoritelgi. Karakteristikud on alla poole kumerad, mis tähendab, et on olemas hajatootjate osakaal võrgus, mille juures on võimsuskad minimaalsed ja millest edasi hakkavad need suurenema. Suurema nimipingega võrgus on võimalik kadusid suurendamata rohkem hajatootmiseseadmeid ühendada. 13,8 kV võrgus oli aktiivkadude suurus väikseim vahemikus 20% kuni 40% ning 69 kV võrgus vahemikus 50-75%. Võrreldes asünkroongeneraatoritega on sünkroongeneraatoritel põhinevate hajatootmiseseadmete kasutamisel punktis 1.1 toodud pingeprofiiliindeks VPI materjali [5] alusel kõrgem, mis tähendab et pinged sõlmedes on sellel juhul paremal tasemel. Ka materjal [1] saadud tulemused kinnitavad, et sünkroongeneraatoril põhinevad hajatootmiseseadmetel on kõrgepingevõrkude pingele positiivne mõju.



Lühise korral ei ole ülekandevõrgus, kuhu on ühendatud sünkroongeneraatoripõhiseid hajatootmisseadmeid, pingelangus võrgu sõlmedes nii suur kui olukorras, kui neid ühendatud ei oleks. [1]

### **1.3.3. Konverterpõhiste tootmisseadmete mõju**

Konverteri käitumine pingelohkude korral sõltub konverteri juhtimisstrateegiast. Enamik võrku ühendatud konverteritest kasutab faasilukk tehnoloogiat ning üritab võrku toodetavat voolu ideaalse siinuselise kujuga vormida. [4, 17]

Konverteripõhised hajatootmisseadmed töötavad enamasti võimsusteguriga üks või selle lähedase väärtusega nii tavaolukorras kui ka pingelohu korral. Seetõttu on konverterpõhistel seadmetel pärijärgnevuspinge seadme klemmidel kõrgem võrreldes sünkroon- ja asünkroongeneraatoritel põhinevate hajatootmisseadmetega. Kusjuures sünkroongeneraatorite pärijärgnevuspinge on pingelohu korral suurem kui asünkroongeneraatorite korral, kuna sünkroongeneraatorid toodavad võrku reaktiivenergiat vastupidiselt asünkroongeneraatoritele, mis reaktiivenergiat tarbivad. [4]

Allikas [4] katsetati kolme tehnoloogia reaktsiooni seitset erinevat tüüpi pingelohkudele, sealhulgas ebasümmeetrilisi pingelohkusi. Konverteri baasil hajatootmisseadmetel madalpingevõrkudes leiti aga olevat oluliselt suurem mõju pingelohkude sügavuse vähendamisele kui kesk- ja kõrgepingevõrkudes. Pingelohud koormusele, mis oli ühendatud konverterbaasil hajatootmisseadmega samasse sõlme, olid leevendatud. Sellegipoolest oli konverteril põhinevate tootjate mõju madalpingevõrkudes oluliselt väiksem kui asünkroon- ja sünkroongeneraatorite mõju kesk- ja kõrgepingevõrkudes.

Allikas [4] modelleeriti lühist 10 kV võrgus põhjustatud pingelohku amplituudiga 0,7 s.ü., 400 V nimipingega madalpingevõrgu sõlmes, kuhu on ühendatud konverterbaasil hajatootmisseadmed. Vaadeldav sõlm on 10 kV võrguga ühendatud läbi 400 kVA trafo ja 800 m 100 kVA madalpingefiidri. See on tüüpiline Kesk-Euroopa maapiirkonna fiider. Simuleeritud on seitset erinevat tüüpi pingelohkusi ning võrreldud olukorda hajatootmisseadmetega ning hajatootmisseadmeteta. Madalpingefiidri pinget mõõdeti 10 erinevas punktis ning võrreldavuse ning ülevaatlikkuse nimel leiti nende keskmised. Simulatsiooni tulemused on toodud tabelis 1.1.

**Tabel 1.1 . Pinge päri- vastu- ja nulljärgnevuskomponendid hajatootmiseseadmetega ja hajatootmiseseadmeteta erinevat tüüpi pingelohkude korral [4]**

	Hajatootmiseseadmeteta			Konverterpõhiste hajatootmiseseadmetega		
	U <sub>1</sub> (pu)	U <sub>2</sub> (pu)	U <sub>3</sub> (pu)	U <sub>1</sub> (pu)	U <sub>2</sub> (pu)	U <sub>3</sub> (pu)
A	0,682	0	0	0,726	0	0
B	0,875	0,097	0,088	0,911	0,092	0,070
C	0,827	0,145	0	0,862	0,136	0
D	0,827	0,145	0	0,862	0,136	0
E	0,779	0,097	0,088	0,818	0,092	0,070
F	0,779	0,0,97	0	0,818	0,092	0
G	0,779	0,097	0	0,818	0,092	0

Nagu eelpool toodud jooniselt näha mõjutab konverterpõhiste hajatootjate olemasolu sõlme pinget pingelohu korral positiivses suunas. Antud simulatsioonis kasutati kolme faasi vahel ühtlaselt jaotatud väikese võimsusega ühefaasilisi konverteriga võrku ühendatud hajatootjaid. Kuna need on ühendatud faasi ja neutraali vahele, siis aitavad need pinge nulljärgnevuskomponenti leevendada. Seetõttu on pinge nulljärgnevuskomponent simulatsioonis pisut vähenenud. Suuremate kolmeefaasiliste konverteriga hajatootjate puhul neutraal tõenäoliselt ei oleks ühendatud ning seetõttu nulljärgnevuskomponendi vähendamist ei toimuks.

Asümmeetriliste pingelohkude korral määravad hajatootmiseseadme vastujärgnevusimpedants ja pinge vastujärgnevuskomponent hajatootmiseseadmes neelduva vastujärgnevusvoolu suuruse. Need voolud kombineerituna võrgu vastujärgnevusimpedantsiga vähendavad vastujärgnevuspinget seadme klemmidel pingelohu korral. Asünkroonmasinate väike vastujärgnevusimpedants tähendab, et nendes tekivad asümmeetriliste pingelohkude korral suured vastujärgnevusvoolud, mis võivad põhjustada lubamatult suurt kuumenemist, mis omakorda põhjustab pöördmomendi võnkumist jõuülekandes (*impose torque ripple on the drive train*). Suured asümmeetrilised voolud võivad põhjustada ka asünkroonmootori välja lülitumist suure vastujärgnevus pingekomponendi ja pika kestusega pingelohkude korral. [4]

Sünkroongeneraatoritel on vastujärgnevusimpedants suurem ning seetõttu ka vastujärgnevusvoolud väiksemad. Läbi konverteri ühendatud hajatootmiseseadmetel on samuti

suur impedants vastujärgnevuspingetele ning seeläbi väiksemad vastujärgnevusvoolud ja väiksem vastujärgnevuspinge leevendamine. [4]

## 1.4. Ülepinge

Pinge tõus üle lubatud piiride kesk- ja madalpingevõrkudes on leitud olevat põhiliseks probleemiks suure hulga hajatootjate võrku ühendamisel. Jaotusvõrgud on ehitatud ajal, mil hajatootmine veel suurt tähtsust ei omanud.

Jaotusvõrgu fiidrid töötavad tüüpiliselt radiaalselt. Fiidritel on puu laadne hargnev topoloogia, mis algab trafo alampingemähisest. Trafode koormuse all lülitatavad astmelülitid aitavad hoida võrgu pinget etteantud piirides, mis tavapäraselt tähendab, et toitva alajaama lattidel hoitakse kõrgemat pinget, garanteerimaks et ka pikkade fiidrite lõpus oleks pinge vähemalt miinimumtasemel. Ehitamisel jälgiti, et antud võrgu konfiguratsiooniga oleks tagatud ettenähtud piiridesse jääv pinge. Samas ei arvestatud tänapäeval järjest enam lisanduvate hajatootmiseseadmetega ja nende poolt lisanduvate võimsusvoogudega. Seetõttu võivad suure hulga hajatootjate poolt genereeritud võimsusvood põhjustada pingetõusu, mille vastu võrgu operaatoril on raske midagi ette võtta. [18]

Enamik võrguoperaatoreid nõuab hajatootjatelt ainult aktiivvõimsuse tootmist ehk töötamist võimsusteguriga 1 või mingi muu ette antud võimsusteguriga ning limiteerib installeeritavaid võimsusi tagamaks võrgueeskirjadele vastav pinge kõigis olukordades. Nende kitsenduste põhjuseid on kaks: esiteks üksik hajatootmiseseade on tavaliselt liiga väike et selle juhtimisega võrgu pinget kontrollida. Teiseks võib automaatne hajatootjate pinge reguleerimine vastuollu sattuda võrguoperaatori pinge reguleerimisega.

Pinge kontroll võimsusfaktori järgi tähendab  $P/Q$  suhte konstantsena hoidmist. Selleks, et reaktiivvõimsus  $Q$  kompenseeriks aktiivvõimsuse  $P$  poolt põhjustatud fiidri pinge tõusu, ehk  $V_G \approx V_0$ , peab  $Q = -RP/X$ , mis on tihti võimatu, kuna suured koormused vajavad suurt hulka reaktiivvõimsust, mida generaator tagada ei suuda. Lisaks, et võimsusfaktorit konstantsena hoida peaks generaator oma seadeid koormuse muutudes pidevalt muutma, mis omakorda eeldaks pidevad koormuse ja võimsusteguri jälgimist sõlmes. [18]

Materjalilis [18] on välja pakutud meetod pingetõusu leevendamiseks, mis hõlmab endas reaktiivvõimsuse kontrolli- leitakse selline genereeritava reaktiivvõimsuse  $Q_G$  väärtus, mille juures genereeritava aktiivvõimsuse  $P_G$  poolt põhjustatud pingetõus oleks minimaalne. Tähistades selle väärtuse  $Q_G^*$  leitakse antud suurus valemiga:

$$Q_G^* \approx \frac{X}{R^2 + X^2} - \sqrt{\left(\frac{X}{R^2 + X^2}\right)^2 - P_G^2 + \frac{2RP_G}{R^2 + X^2}} \quad (1.9)$$

Reaktiivvõimsus  $Q_G^*$  lahendab ainult genereeritava aktiivvõimsuse  $P_G$  poolt põhjustatud pingetõusu probleemi. Materjali [18] mudeli järgi leevendab  $Q_G^*$  pingetõusu probleemi nii maksimaalse kui ka nullkoormuse korral ehk sellest lähtuvalt ka kõigi vahepealsete koormuste korral.

## 1.5. Nõuded hajatootmisseadmetele

Esimeste hajatootmisseadmete lisandumisel elektrivõrku nõudsid enamik võrguoperaatoreid rikke korral võrgus hajatootmisseadmete kohest väljalülitumisi. Praegusel ajal selline toimimisviis enam lubatud ei ole. Selleks, et tagada jätkusuutlikku võrgu töökindlust koos suure hajatootjate osakaaluga nõuavad võrguoperaatorid, sealhulgas Eesti võrguoperaator Elering, liitunud hajatootmisseadmetelt lühiajalist alapinge talumise võimet. Erinevalt alapinge talumise võimest, mis on kehtestatud praktiliselt üle maailma ei ole enamikes riikides lubatud hajatootmisseadmetel jääda katkestuse ajal töösse saartalitluses. Pinge kadumisel võrgust ning tootmisseadme väljalülitumisel võib Eesti võrgueeskirja kohasel jaama tagasi lülitada alles 5 minuti möödumisel võrgupinge taastumisest [4, 13, 19]

Eesti põhivõrgu haldur Elering klassifitseerib tootmisseadmed nelja klassi: [20]

- Klass 1- tootmisseadmed nimiaktiivvõimusega kuni 200 kW
- Klass 2- tootmisseadmed nimiaktiivvõimusega üle 200 kW kuni 1 MW
- Klass 3- tootmisseadmed nimiaktiivvõimusega üle 1 MW kuni 10 MW
- Klass 4- tootmisseadmed nimiaktiivvõimusega üle 10 MW või liitumispunkt pingel 110 kV või 330 kV

Elektrilevi ühendab üldjuhul võrguga elektriijaama, mille nimiaktiivvõimsus ei ületa 5 MW, üle 1 MW nimiaktiivvõimsusega elektriijaama ühendamine süsteemiga kooskõlastatakse süsteemihalduriga. Kui tegemist on elektrituuliku, tuulepargi või päikeseelektriijaamaga tuleb liitumine kooskõlastada põhivõrguettevõtjaga nimiaktiivvõimsuse juures 200 kW või rohkem. Väike ja mikrotootjate puhul tuleb üle 15 kW nimivõimsusega elektriijaama elektriosa projekt kooskõlastada võrguettevõtjaga.

Asünkroongeneraatori talitlemiseks vajalik reaktiivvõimsus tuleb tasakaalustada kohapeal põhimõttel, et võrgust tarbitav kui ka võrku antav reaktiivvõimsus oleks minimaalne. Lubatud

on reaktiivvõimsuse kõikumine piirides  $\pm 10\%$  nimiaktiivvõimsusest. Sama nõue on ka elektrituuliku, tuulepargi või päikeseelektrijaama korral. [19]

Võrguhäire korral peab olema võimalik juhtida väljastatavat reaktiivvõimsust kogu tehniliselt võimaliku reservi ulatuses. Reaktiivvõimsuse reguleerimine peab käima pinge ja reaktiivvõimsuse järgi. Üle 200 kW elektrituulikutel, tuulepargil või päikeseelektrijaamal peab korral olema võimalik aktiivvõimsuse kiire piiramine nimiaktiivvõimsusest kuni 20%-ni nimiaktiivvõimsusest kahe sekundi jooksul alates signaali jõudmisest seadmeni. Pinge- või sageduskaitse toimimisel on lubatud elektrituulikut, tuuleparki või päikeseelektrijaama uuesti võrku lülitada kui pinge või sagedus on elektrivõrgus vähemalt kümneks minutiks jäänud lubatud piiridesse.

Kui elektrijama liitumispunkt elektrivõrguga asub süsteemiga ühendava trafo ülempingepoolel, peavad generaator ja selle abiseadmed elektrivõrgust välja lülitumata taluma järgmisi lühisest tulenevaid pingemuutusi: [19]

- pinge järsk alanemine liitumispunktis 0,25 sekundiks 0%-ni nimipingest
- pinge alanemisele järgnev pinge lineaarne tõus 0,5 sekundi jooksul 25%-st 90%-ni nimipingest
- liitumispunkti pinge hoidmine tasemel, mis on vähemalt 90% liitumispunkti elektrivõrgu nimipingest. Sellisel juhul on lubatud võimsuse vähenemine 10% nimivõimsusest.

Kõik tootmiseseadmed nimiaktiivvõimsusega üle 5 MW peavad põhivõrguga liitumisel läbima Eesti võrgueeskirja katsetused. Tootmiseseadme katsetused enne normaaltöösse lubamist viiakse üldjuhul läbi kolmes etapis, milleks on kvaliteedimõõtmised, tootmiseseadme funktsionaalsed katsetused ja lühise läbimisvõime katse (FRT). [11, 20]

Järgnevalt on toodud sageduse ja pinge ajalised piirid, mida tootjad peavad olema võimelised taluma.

**Tabel 1.2. Eleringi nõuded talitlusele sageduse muutumisel [20]**

<b>Sagedus, Hz</b>	<b>Ajaperiood</b>
47,5-49	Vähemalt 30 min
49-51	Kestvalt
51-53	Vähemalt 180 sekundit

**Tabel 1.3 Eleringi nõuded tootmiseseadme talitlusele pingel muutumisel [20]**

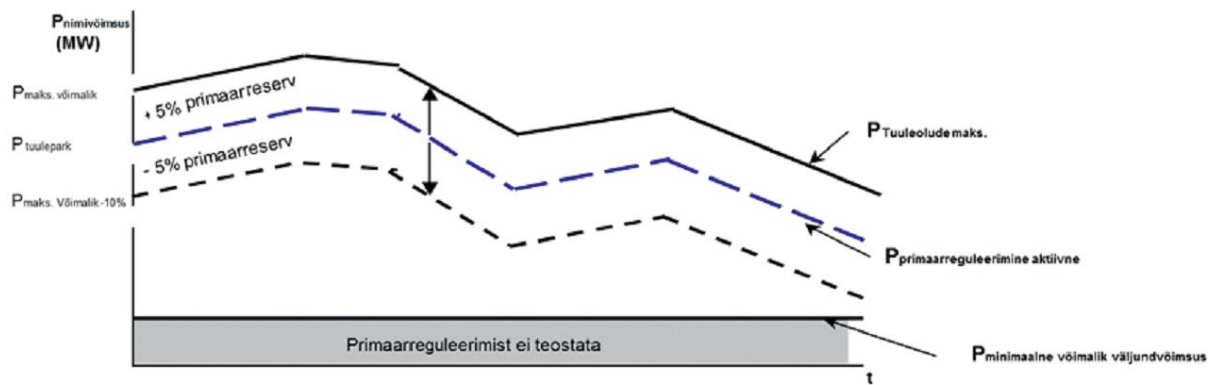
Pinge, kV		Ajaperiood
Nimipingel 110kV	Nimipingel 330kV	
97-105	280-320	Vähemalt 60 minutit
105-123	320-362	Kestvalt
123-126,5	362-379,5	Vähemalt 60 minutit

Põhivõrguga ühendatud tootmiseseade peab olema võimeline primaarreguleerimisel osalema ja täitma võrgueeskirjas toodud primaarreguleerimise tingimusi. Primaarreguleerimisel on aluseks järgmised terminid:

- Primaarreserv- tootmiseseadme primaarreguleerimise ulatus
- Tundetustsoon- hälve nimisagedusest, mille korral tootmiseseade ei teosta primaarreguleerimist
- Statism- sageduse suhtelise muutuse suhe võimsuse suhtelisse muutusesse, arvutatakse valemiga 1.10.

$$Statism_{\%} = \frac{P_{nimi} \cdot \Delta f}{\Delta P \cdot 50} \cdot 100 \quad (1.10)$$

Päikese ja tuuleelektrijaamad, mille väljundaktiivvõimsus sõltub ilmastikutingimustest, rakendatakse primaarreservi tekitamist vastavalt maksimaalsele võimalikule hetkväljundvõimsusele vastavalt joonisele 1.10.



**Joonis 1.4. Primaarreguleerimine päikese- ja tuuleelektrijaamade korral [20]**

Tootjal peavad olema järgmised kaitsed: [19, 20]

- liigvoolukaitse
- üle- ja alapingekaitse
- sageduskaitse
- pinge asümmeetriakaitse
- võrgukaotuskaitse

## 2. Koormuste modelleerimine

Elektrivõrgu sõlmekoormus koosneb suure arvu tarbijate summaarsest aktiiv- ja reaktiivkoormusest, millele lisanduvad ka kaod tarbijaid sõlmega ühendatavates seadmetes. Arvesse tuleb võtta ka vaadeldava sõlmega ühenduses olevaid genereerivaid allikaid. Koormuse modelleerimine on keeruline, kuna stabiilsusanalüüsi jaoks modelleeritav sõlm koosneb suurest hulgast erinevatest tarbijatest. Koormuse täpset kompositsiooni on raske hinnata ning see muutub kellaajast, aastaajast, ilmastikuoludest ja paljust muust sõltuvalt. Kuna kõrgepingesõlmedes on koormuse täpset koosseisu ja sellele sobivat mudeli äärmiselt raske leida, siis kasutatakse koormusmudelina tihti peale staatilist eksponentsiaalset koormusmudelit. [6, 16, 21, 22]

Traditsiooniliselt on generaatorite ning ülekandeseadmete modelleerimisele suurt tähelepanu pööratud, jättes koormuse modelleerimise pisut tagaplaanile, olgugi, et juba 1930.-ndatel oli teada, et koormuse korrektne modelleerimine on võrgu stabiilsusarvutustes äärmiselt tähtsal kohal. Ammu on tõdetud, et võrgu pinge- ja nurgastabiilsuse analüüsid sõltuvad suurel määral koormusmudeli valikust ning selle parameetrite määramise täpsusest. Kuna tänapäeval töötavad paljud süsteemid oma stabiilsuspiiri lähistel, siis on paratamatult vaja kõigi võrgu elementide väga täpset simuleerimist võrguarvutustes, tagamaks võrgu töökindlust. Pingestabiilsusena defineeritakse energiasüsteemi võimet hoida normaalolukorras kõigis sõlmedes ettenähtud pinget peale väikest häiringut. Ebastabiilsuse põhiliseks põhjuseks on reaktiivenergia puudujääk. [1, 21, 23, 24]

Sõlmekoormuste ekvivalentsete karakteristikute hindamisel on kasutusel komponendipõhine ja mõõtmispõhine lähenemisviis. Esimese lähenemisviisi korral peab teadma koormuse komponentidele kohaldatavaid modelleerimisparameetreid ja nende osakaalusid antud sõlmes. Mõõtmispõhise lähenemisviisi korral aga ei ole ilmingimata koormuse kompositsiooni ja parameetreid teada vaja, koormusmudelid leitakse mõõtmistulemuste alusel. Parim viis koormuse parameetrite leidmiseks ongi mõõtmiste alusel katsetulemuste põhjal igale juhtumile eraldi. Ühes kohas ühel ajahetkel mõõtmiste alusel leitud koormuste kompositsiooni ei tohiks aga laiendada põhjalikult kaalutlemata teistele tingimustele või teistesse sõlmedesse. [6, 24]

Koormusmudelid jaotatakse kahte gruppi- staatilised ja dünaamilised. Koormuse hetkelise muutuse kirjeldamiseks peale sageduse või pinge väiksemat muutumist kasutatakse staatilisi



koormusmudeleid. Staatilised koormusmodelid kirjeldavad algebralise funktsioonina aktiiv- ja reaktiivvõimsuse sõltuvust pingest ja sagedusest.

Dünaamilised koormused reageerivad pinge või sageduse muutusele aga ajast sõltuvalt. Dünaamilisi koormusmudeleid kirjeldatakse tavaliselt diferentsiaalvõrranditega aktiiv- ja reaktiivkoormuse sõltuvusena pingest ja sagedusest. [25, 26]

Staatiliste aktiiv- ja reaktiivkoormuste pingetundlikkused võib mõõtmiste alusel leida, muutes koormuse pinget näiteks toitetrafoode astmelülititega. Sagedust seevastu saab muuta vaid isoleeritud süsteemides. Ühendsüsteemides hinnatakse koormuse sagedustundlikkust kaudselt. Katsete alusel saab hinnata väikestele talitlushäiringutele vastavaid karakteristikuid. Katseid pole mõeldav teha koormuse dünaamiliste omaduste väljaselgitamiseks suurte häiringute korral. [21]

Kõige sagedasem lähenemine on modelleerida aktiiv- ka reaktiivvõimsuse sõltuvust pingest eksponentidena. Seejuures eeldatakse konstantset võimsustegurit aktiiv- ja reaktiivkoormuste vahel. Samas aktiiv- ja reaktiivkoormuste muutumiskiirused pinge muutudes on erinevad. Selle tulemusel muutub paratamatult ka võimsustegur. Konstantse võimsusteguri eeldamine võib halvemal juhul viia veani koormuse mõju arvestamisel süsteemi stabiilsusele.

Koormuskarakteristikud, mis on määratud väikese pinge muutuse alusel on tihti kasutusel uuringutes, mis tegelevad suurte pingemuutuste analüüsiga. Selline üldistamine on ohtlik, kuna koormused võivad käituda erinevalt erineva suurusega pingemuutuste korral. [21]

Käesolevas peatükis antakse esmalt ülevaade levinumatest staatilistest ja dünaamilistest koormusmudelitest ning peatüki lõpus leitakse Elektrilevi koormusklasside tarbimisandmete ning kirjandusest leitavate koormusklasside pingetundlikkustegurite alusel Sikassaare alajaama resulteeruvad koormuse pingetundlikkustegurid.

## **2.1. Staatilised koormusmodelid**

Staatilisi koormusmudeleid saab kasutada olukorras, kus koormusele mõjuvad lihtsad, praktiliselt hetkelised toimumisajast sõltumatud pinge või sageduse muutused. Staatilisi koormusmudeleid saab kasutada ka modelleerimaks koormust, mille reaktsioon pinge ja/või sageduse muutusele on niivõrd kiire, et mõõteseadmed protsessi dünaamikat tuvastada ei suuda või kui vaadeldakse koormuse käitumist ilma, et tähelepanu pööratakse esialgsetele transientidele. Staatilisi koormusmudeleid kasutatakse peamiselt parameetrite arvutamiseks püsiolukorras ning püsiolukorra simuleerimiseks. Kuna staatilised karakteristikud koormuse

dünaamikat arvesse ei võta siis ei ole need mudelid sobilikud võrgu pinge ja nurgastabiilsuse analüüsiks. Staatilise koormusmudeli üldvorm, mis kirjeldab aktiiv- ja reaktiivvõimsuse sõltuvust pingest ja sagedusest on : [22, 24, 25]

$$\begin{aligned} P &= f_P(U, f) \\ Q &= f_Q(U, f) \end{aligned} \tag{2.1}$$

Staatilisi koormusmudeleid kasutatakse tihti takistuslike koormuste, valgustuse, kodumajapidamiste koormuse ja teiste sarnaste agregeeritud koormuste modelleerimisel, milles on vähe suuri elektriajameid. [25]

Koormuse täpse modelleerimise tähtsusest lähtuvalt on välja töötatud hulgaliselt erinevaid staatilisi koormusmudeleid. Suurele hulgale vaatamata täidavad nad ühte eesmärki- koormuse pinge ja võimalusel sageduse sõltuvuse kirjeldamine. Kasutusel on staatilistest koormusmudelitest järgmised: eksponent-, polünoom-, lineaar-, komposiit-, staatiline induktsioonmootori- ja jõuelektroonika koormusmudel. [23, 25]

### 2.1.1 Eksponentmudel

Kõige levinum vorm staatilistest koormusmudelitest on eksponentsiaalne koormusmudel, mis avaldub kui: [25]

$$\begin{aligned} P &= P_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{k_{pu}} \left( \frac{f}{f_n} \right)^{k_{pf}} \\ Q &= Q_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{k_{qu}} \left( \frac{f}{f_n} \right)^{k_{qf}} \end{aligned} \tag{2.2}$$

Aktiiv- ja reaktiivkoormuse pinge- ja sagedussõltuvust iseloomustavad eksponendid  $k_{pu}$ ,  $k_{qu}$ ,  $k_{pf}$  ja  $k_{qf}$  sõltuvad koormuse tüübist ja kompositsioonist ning tuleb iga sõlme jaoks vastavalt selle koormuse eripäradele eraldi leida. Kirjanduses on küll toodud ka erinevat tüüpi koormuse jaoks eksponentide teoreetilised väärtused, kuid tihtipeale on erinevates allikates toodud erinevad eksponendi väärtused, mis muudab korrektse väärtuse valimise kirjanduse abil äärmiselt raskeks. [21, 25]

Materjalis [21] pakutakse välja pisut teistsugune lähenemisviis koormuse pingesõltuvuse kirjeldamiseks. Nimelt leitakse antud materjalis, et mõistlikum on kasutada kõrgepingesõlmede agregeeritud koormuse modelleerimiseks aktiiv- ja näivvõimsuse pingesõltuvust vastupidiselt aktiiv- ja reaktiivvõimsuste pingesõltuvuste modelleerimisele,

kuna reaktiivvõimsuse pingetundlikkustegur võib teatud olukordades lõpmatuseni läheneda. Kui aktiiv- ja näivkoormuse pingesõltuvused on teada, siis on ka reaktiivkoormuse pingesõltuvus võrdlemisi hästi kirjeldatud, ilma vajaduseta modelleerida eraldi reaktiivkoormuse pingesõltuvust.

Kõigi uuritud pingele ja võimsusteguri väärtuste puhul jäid näivvõimsuse pingele eksponendid realistlikess piiridesse erinevalt reaktiivvõimsuse pingeksponentidest. Seetõttu järeldatakse allikas [21], et tegemist on usaldusväärsema parameetriga kui reaktiivkoormuse pingeksponent.

Koormuse sõltuvust sageduse väikestest hälvetest konstantsel pingel saab modelleerida ka Taylori reaga, kuna sagedusmuutused on pingemuutustest olulisemalt väiksemad. Alternatiivse eksponentmudeli üldkuju oleks sellisel juhul: [25]

$$P = P_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{k_{pu}} (1 + k_{pf} \Delta f)$$

$$Q = Q_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{k_{qu}} (1 + k_{qf} \Delta f)$$
(2.3)

Kus  $\Delta f$  on sageduse suhteline hälve  $\Delta f = \frac{f-f_n}{f_n}$

$k_f$  väärtus jääb aktiivvõimsuse sagedussõltuvuse korral enamasti vahemikku -0,3...5,6 ja reaktiivvõimsusel vahemikku -2,3...4,2. Avaldise (2.2) korral on  $k_f$  väärtus aktiivvõimsusel vahemikus -2...3 ja reaktiivvõimsusel -5...1,8. Taylori rea abil saadud avaldis on laiemalt levinud ning uuringute poolt soovitatud [21, 22, 27]

Kuna erinevalt pingest on sagedus väga konstantne, siis sageli vaadeldakse koormuste modelleerimisel vaid selle pingesõltuvust ja jäetakse sagedussõltuvus välja. Sellisel juhul koormuse eksponentmudeli avaldis lihtsustub pisut: [22]

$$P = P_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{k_{pu}}$$

$$Q = Q_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{k_{qu}}$$
(2.4)

Juhul kui pingele eksponentide  $k_{pu}$  ja  $k_{qu}$  väärtused on 0, 1 või 2, siis on tegu vastavalt konstantse võimsuse, konstantse vooluga või konstantse impedantsiga koormuskarakteristikuga.

Võttes reaktiivvõimsuse mudelis ka reaktiivvõimsuse kompenseerimist arvesse, omandab see kuju: [22]

$$Q = \left( Q_n - \frac{dQ}{dP} P_n \right) \left( \frac{U}{U_n} \right)^2 \left( 1 + \frac{\Delta f}{f_n} \right) \left( \frac{U}{U_n} \right)^{k_{qu}} (1 + k_{qf} \Delta f) \quad (2.5)$$

Valemi esimeses pooles on arvestatud reaktiivvõimsuse kompenseerimist, teises pooles aga kompenseerimata reaktiivvõimsust või induktiivset tarbijat. Kompensaatori reaktiivvõimsus avaldub valemiga:

$$Q_c = \left( \frac{dQ}{dP} P_n - Q_n \right) \quad (2.6)$$

Positiivne  $Q_c$  väärtus tähendab mahtuvuslikku koormust, positiivne  $Q$  aga vastab induktiivsele koormusele. Antud meetodi eeldus on, et kompenseerimine on konstantne.

### 2.1.2 Polünoom- ehk ZIP-mudel

Varastes arvutiprogrammides modelleeriti stabiilsusarvutustes koormust tavaliselt kombinatsioonina konstantse impedantsi, konstantse voolu ja konstantse võimsuse kombinatsioonina. Sellise koormusmudeli üldavaldis on: [21]

$$P(U) = P_0 \left( p_1 \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 + p_2 \left( \frac{U}{U_0} \right) + p_3 \right) \quad (2.7)$$

$$Q(U) = Q_0 \left( q_1 \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 + q_2 \left( \frac{U}{U_0} \right) + q_3 \right)$$

ja

$$P_0 = P_{01} + P_{02} + P_{03} \quad (2.8)$$

$$Q_0 = Q_{01} + Q_{02} + Q_{03}$$

Kus  $P_0$ ,  $Q_0$  ja  $U_0$  on vastavalt nimiaktiiv- ja reaktiivvõimsus ning sõlme nimipinge, Koefitsiendid  $p_i$  ja  $q_i$ ,  $i=1, \dots, 3$  kirjeldavad konstantse impedantsiga, konstantse vooluga ja konstantse võimsusega koormuse osakaalu kogukoormusest. [21, 22]

Antud mudel on tuntud polünoommudelina või ZIP mudelina, kuna see ühendab kolme konstantset parameetrit, milleks on konstantne impedants ( $Z$ ), konstantne vool ( $I$ ) ja konstantne koormus ( $P$ ).

Parameetrid  $p_1$  ja  $q_1$  kirjeldavad konstantse impedantsiga mudeli osakaalu,  $p_2$  ja  $q_2$  näitavad konstantse vooluga mudeli osakaalu ning  $p_3$  ja  $q_3$  näitavad konstantse võimsusega mudeli osakaalu. Iga parameetri väärtus jääb vahemikku  $0 \dots 1$  ning nende kogusumma on 1.

Polünoomudel on efektiivne koormuste modelleerimiseks ja hea ettekujutuse saamiseks staatilistest karakteristikutest nimipinge läheduses.

Võtmaks arvesse ka sageduse mõju korrutatakse mudeli üldavaldis läbi teguriga  $(1 + k_{qf}\Delta f)$  ning mudel võtab kuju:

$$P(U) = P_0(p_1 \left(\frac{U}{U_0}\right)^2 + p_2 \left(\frac{U}{U_0}\right) + p_3) \cdot (1 + k_{pf}\Delta f)$$

$$Q(U) = Q_0(q_1 \left(\frac{U}{U_0}\right)^2 + q_2 \left(\frac{U}{U_0}\right) + q_3) \cdot (1 + k_{qf}\Delta f)$$
(2.9)

### 2.1.3 Lineaarmudel

Lineaarset koormusmudelit kasutatakse uurimustes, kus pinge muutub kitsas vahemikus nimiväärtuse ümber nagu näiteks väikesele häiringule järgnevas stabiilsusanalüüsis. Lineaarset koormusmudelit ei ole soovitatav kasutada suurte pingemuutuste korral, sest see võib modelleerimisel kaasa tuua ebatäpsust. [25]

Lineaarse koormusmudeli üldkuju on toodud valemis (2.10). Sellel on kaks parameetrit  $a_0$  ja  $a_1$  aktiivkoormuse jaoks ja kaks parameetrit  $b_0$  ja  $b_1$  reaktiivkoormuse jaoks. [22, 25]

$$P = P_n(a_0 + a_1 \frac{U}{U_n})$$

$$Q = Q_n(b_0 + b_1 \frac{U}{U_n})$$
(2.10)

Uuringud on näidanud aga, et reaktiivvõimsus tavaliselt käitub polünoom- ehk ZIP mudeli kohaselt. Samas uurimuses jõuti järeldusele, et on soovituslik kasutada lineaarmudelit aktiivkoormuse modelleerimiseks, kuid reaktiivkoormuse modelleerimiseks tuleks eelistada ZIP mudelit. [22, 25]

Nimisuuruste  $P_n, Q_n$  ja  $U_n$  asemel võib mudelis kasutada häiringule eelnenud suurusi  $P_0, Q_0$  ja  $U_0$  [22]

## 2.1.4 Komposiitmudel

Komposiitmudelit on sobilik kasutada koormuste modelleerimiseks äärmiselt madalate pingete juures. Mudeli eesmärgiks on üheaegselt kirjeldada nii staatilisi kui ka dünaamilisi koormuskarakteristikuid, võttes lisaks arvesse ka pöörlevate seadmete võimaliku seiskumist. Lisaks erinevatele pöörlevatele seadmetele võib nominaalväärtusest oluliselt madalam pinge põhjustada ka mitmesugust tüüpi staatilise koormuse, nagu näiteks jõuelektroonikaseadmed, väljalülitumist. [22, 25]

Erinevatel seadmetel on erinev lävi, millest madalama pinge korral nad enam ei tööta. Mõningad näited: [25]

- HD telerid ei tööta pingel 48...65% ja madalamal nominaalpingest
- kompaktluminofoorlambid kustuvad 17...35% pinge korral
- jõuelektroonika lülitub välja pinge korral 80..85% nimipingest
- konditsioneerid seiskuvad sõltuvalt välisõhu temperatuurist pinge 50...73% juures ning konditsioneeride magnetkontaktid avanevad 40...52% pinge juures.

Komposiitmudel koosneb ühest polünoom ja kahest eksponentmudelist, kusjuures igal alamudelil on oma parameetrid. Staatilise komposiitmudeli üldkuju on: [22, 25]

$$P = P_n(P_{ZIP} + P_{EX1} + P_{EX2}) \quad (2.11)$$

Kus

$$P_{ZIP} = p_1 \left(\frac{U}{U_0}\right)^2 + p_2 \left(\frac{U}{U_0}\right) + p_3 \quad (2.12)$$

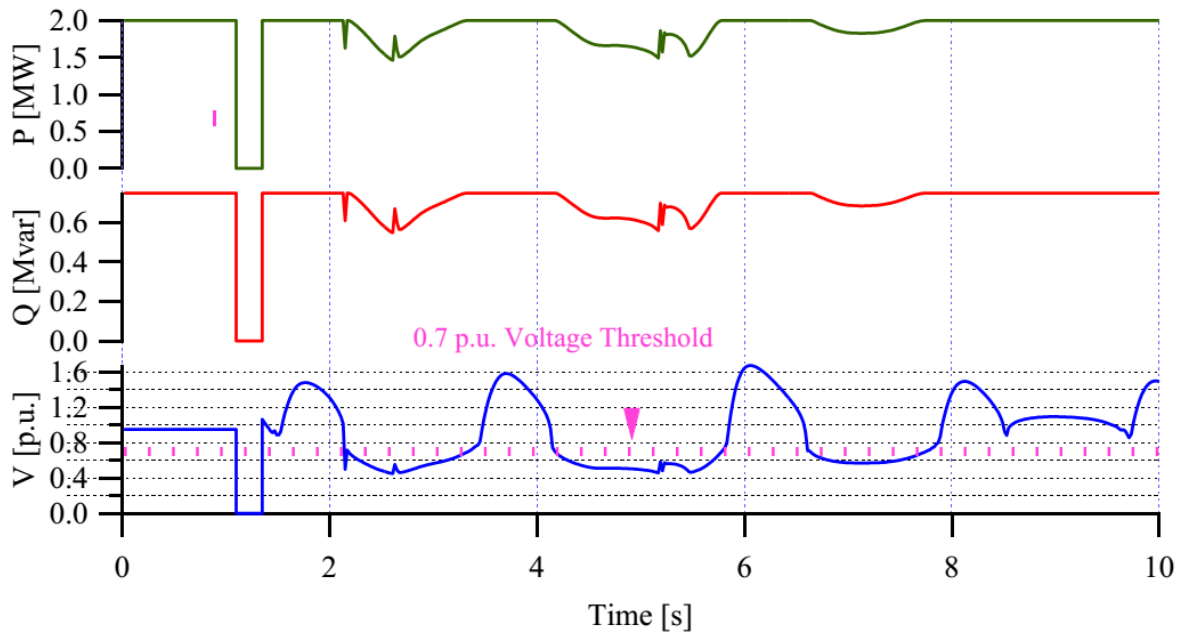
$$P_{EX1} = p_4 \left(\frac{U}{U_n}\right)^{a_1} (1 + k_{pf1}\Delta f)$$

$$P_{EX2} = p_5 \left(\frac{U}{U_n}\right)^{a_2} (1 + k_{p2}\Delta f)$$

Reaktiivkoormuste modelleerimine toimub analoogsete valemitega.

Paljudes tarkvarades kasutatakse konstantse vooluga ja konstantse võimsusega komponente, milles polünoommudel on lülitatud elliptilisele voolu-pinge karakteristikule või kui pinge langeb alla lävipinge, milleks on tavaliselt 0,7 nimipingest, siis lülitub see konstantse takistusega mudelile.

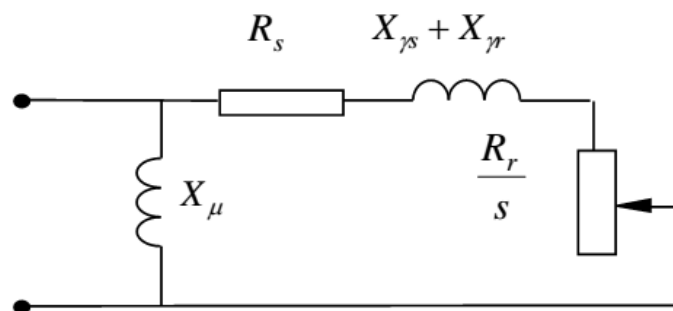
Kui koormussõlme pinge on näiteks lühise olukorras väga madal, ei jää tarbitav enam konstantseks, vaid vool kasvab oluliselt põhjustades sellega kokkuvõttes arvutusvea.



*Joonis 2.1. Näide automaatselt koormuskarakteristiku vahetusest pinge langemisel alla lävipinge [25]*

### 2.1.5 Asünkroonmootori staatiline mudel

Asünkroonmootorite osakaal koormuses on tavaliselt üsna suur, küündides lausa kuni 60...70%-ni kogukoormusest. Seda tüüpi koormuse modelleerimiseks kasutatakse tihtipeale asünkroonmootori staatilist mudelit. Antud mudel tuletatakse asünkroonmootori ekvivalentse aseskeemi alusel, mis on toodud alljärgneval joonisel 2.2.



*Joonis 2.2. Asünkroonmootori ekvivalentne aseskeem [22]*

Kus  $R_s$ - staatori aktiivtakistus;

$X_\mu$ - magneetimisreaktants;

$R_r$ - rootori aktiivtakistus;

$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$  – rootori libistus;

$X_{\gamma s}$ - staatori puiste-reaktiivtakistus;  $\omega_s$ - sünkroonkiirus;

$X_{\gamma r}$ - rootori puiste-reaktiivtakistus;  $\omega$ - rootori ringkiirus.

Vastavalt asünkroonmootori aseskeemile avalduvad aktiiv- ja reaktiivvõimsuse staatilised karakteristikud valemitega: [25]

$$P = \left(R_s + \frac{R_r}{s}\right) \cdot \frac{U^2}{\left(R_s + \frac{R_r}{s}\right) + (X_s + X_r)^2} \quad (2.13)$$

$$Q = (X_s + X_r) \cdot \frac{U^2}{\left(R_s + \frac{R_r}{s}\right) + (X_s + X_r)^2} + \frac{U^2}{X_\mu}$$

IEEE poolt soovitatud asünkroonmootori mudeli parameetrid on toodud järgnevas tabelis 2.1

**Tabel 2.1. Asünkroonmootori staatilise mudeli parameetrid [22]**

Asünkroonmootori tüüp	$R_s$	$X_s$	$X_\mu$	$R_r$	$X_r$
Väike tööstusmootor	0,031	0,1	3,2	0,018	0,18
Suur tööstusmootor	0,013	0,067	3,8	0,009	0,17
Veepump	0,013	0,14	2,4	0,009	0,12
Elektrijaama omatarve	0,013	0,14	2,4	0,009	0,12
Kaaluteguriga agregeeritud kodumootorid	0,077	0,107	2,22	0,079	0,098
Kaaluteguriga agregeeritud kodu- ja tööstusmootorid	0,035	0,094	2,8	0,048	0,163
Kaaluteguriga agregeeritud mootorid suure konditsioneeride osakaaluga	0,064	0,091	2,23	0,059	0,071

## 2.2. Dünaamilised koormusmudelid

Dünaamilisi koormusmudeleid kasutatakse süsteemi dünaamika uurimisel ehk uuritakse süsteemi käitumist peale suuremaid või väiksemaid häireid. [24]

Dünaamilise koormusmudeli üldkuju on väga lähedane staatilise koormusmudeli omale. Peamiseks erinevuseks nende vahel on dünaamilise koormusmudeli sõltuvus ajast võrduse paremal pool: [25]

$$P = f_P(U, f, t) \quad (2.14)$$

$$Q = f_Q(U, f, t)$$

Dünaamilisi koormusmudeleid kasutatakse tihti koormuse modelleerimiseks, milles on arvestatav hulk mootoreid ja muid elektriajameid. Laiemalt kasutusel olevad dünaamilised



koormusmudelid on: eksponent, dünaamilised asünkroonmootori mudelid (IM), asünkroonmootori ülekandefunktsiooni ja komposiitmudel. [22, 25]

### 2.2.1 Dünaamiline eksponentmudel

Dünaamiline eksponentmudel on väga liigipõhine, kirjeldades asünkroonmootorite, trafode astmelülite ja soojuskoormuse reageerimist suurtele pingemuutustele. Pinge astmelise muutuse korral toimub võimsuse eksponentsiaalne muutumine. Kui vastavad eksponentfunktsioonid  $P_s(U)$  ja  $P_t(U)$  on kindlaks määratud, on dünaamilise eksponentmudeli kuju: [25]

$$T_p \frac{dP_r}{dt} + P_r = P_s(U) + P_t(U) = P_0 \left(\frac{U}{U_0}\right)^{a_s} + P_0 \left(\frac{U}{U_0}\right)^{a_t} \text{ ja} \quad (2.15)$$

$$P_l = P_r + P_0 \left(\frac{U}{U_0}\right)^{a_t}$$

Kus:  $P_r$ - aktiivvõimsuse taastumine;

$P_0$ - aktiivvõimsuse algväärtus enne pinge muutumist;

$U_0$ - pinge algväärtus;

$T_p$ - aktiivvõimsuse taastumise ajakonstant;

$a_s$ - aktiivvõimsuse staatiline ajakonstant;

$a_t$ - aktiivvõimsuse dünaamiline (transient) eksponent;

$P_l$ - tarbitav aktiivvõimsus;

$Q_r$ - reaktiivvõimsuse taastumine;

$Q_0$ - reaktiivvõimsuse algväärtus enne pinge muutumist;

$T_q$ - reaktiivvõimsuse taastumise ajakonstant;

$\beta_s$ - reaktiivvõimsuse staatiline eksponent;

$\beta_t$ - reaktiivvõimsuse dünaamiline (transient) eksponent;

$Q_l$ - tarbitav koormuse reaktiivvõimsus.

Reaktiivkoormuse reaktsiooni kirjeldab sarnane valem, kus ainul on aktiivvõimsuse näitajad asendatud reaktiivvõimsuse omadega.

Asünkroonmootori koormuse lühiajaliste reaktsioonide puhul dünaamiline eksponentmudel kasutamiseks ei sobi, kuna antud mudel ei võta arvesse asünkroonmootori sisemisi seoseid aktiiv- ja reaktiivvõimsuste vahel. Mudelit võib siiski kasutada pikaajalise pingestabiilsuse uurimisel või astmelülitit omava trafo kaudu toidetavas jaotusvõrgus. [22, 25]

Väikeste häiringute jaoks saab kasutada eksponentmudeli lineariseeritud vormi: [22]

$$\Delta P_l = \frac{P_0}{U_0} a_s \frac{\left(\frac{a_t}{a_s} T_p s + 1\right)}{T_p s + 1} \Delta U \quad (2.16)$$

## 2.2.2 Asünkroonmootori dünaamiline mudel

Dünaamilist eksponentmudelit on mõistlik kasutada juhul, kui asünkroonmootorite osakaal on väike ja väiksema mootorite osakaaluga kodukoormus moodustab kogukoormusest olulise osa. Kui aga kogukoormuse hulgas on olulisel määral asünkroonmootoreid, siis tuleb kasutada spetsiaalset asünkroonmootorite dünaamilist mudelit. Järgnevalt on toodud kolmefaasilise asünkroonmootori viiendat järku dünaamiline mudel: [22, 25]

$$\begin{aligned} u_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{d\tau} - \omega_s \psi_{qs} \\ u_{qs} &= R_s i_{dq} + \frac{d\psi_{qs}}{d\tau} - \omega_s \psi_{ds} \\ u_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{d\tau} - (\omega_s - \omega) \psi_{qs} \\ u_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{d\tau} - (\omega_s - \omega) \psi_{ds} \\ \frac{d\omega}{d\tau} &= \frac{(M_e - M)}{\omega_b T_m} \\ \psi_{ds} &= X_s i_{ds} + X_m i_{dr} \\ \psi_{qs} &= X_s i_{qs} + X_m i_{qr} \\ \psi_{dr} &= X_m i_{ds} + X_r i_{dr} \\ \psi_{qr} &= X_m i_{qs} + X_r i_{qr} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Kus  $u_{ds}, u_{qs}$ - staatori pinge komponendid;

$u_{dr}, u_{qr}$ - rootori pinge komponendid;

$i_{ds}, i_{qs}$ - staatori voolu komponendid;  
 $i_{dr}, i_{qr}$ - rootori voolu komponendid;  
 $\psi_{ds}, \psi_{qs}$ - staatori aheldusvood;  
 $\psi_{dr}, \psi_{qr}$ - rootori aheldusvood;  
 $R_s, R_r$ - staatori ja rootori aktiivtakistused;  
 $X_s = X_\mu + X_{\gamma s}$  – staatori põikreaktiivtakistus;  
 $X_r = X_\mu + X_{\gamma r}$  – rootori reaktiivtakistus;  
 $X_{\gamma s}$ - staatori puiste-reaktiivtakistus;  
 $X_{\gamma r}$ - rootori puiste-reaktiivtakistus;  
 $X_\mu$ - magneetimisreaktants;  
 $\omega_b$ - sünkroonkiirus;  
 $M$  – mehaaniline koormuse pöördemoment;  
 $\tau = \omega_b t$  - normaliseeritud aeg;  
 $T_m$ - mootori mehaaniline ajakonstant;  
 $M_e = X_\mu(i_{qs}i_{dr} - i_{ds}i_{qr})$ - elektromagnetiline pöördemoment.

Staatori transientidega tavaliselt ülaltoodud mudeli praktilistes rakendustes ei arvestata, sel juhul taandub mudel kolmandat järku mudeliks kasutades ülaltoodud valemitest vaid esimest kaht. Vaid suurte ja kogukoormuse hulgas olulist mõju avaldavate asünkroonmootorite korral kasutatakse viiendat järku mudelit, muudel juhtudel piisab täiesti kolmandat järku mudelist. [22, 25]

### 2.2.3 Asünkroonmootori ülekandefunktsiooni mudel

Ülekandefunktsioonid aitavad modelleerida koormusi, milles lisaks staatilisele koormusel on ka suurel hulgal asünkroonmootoreid. Kasutusel on esimest, teist ja kolmandat järku ülekandefunktsioonid. Esimest järku ülekandefunktsioon on toodud järgnevalt:

$$\Delta P(s) = \frac{k_{pf} + T_{pf}s}{1 + T_1s} \Delta f(s) + \frac{k_{pu} + T_{pu}s}{1 + T_1s} \Delta U(s) \quad (2.18)$$

$$\Delta Q(s) = \frac{k_{qf} + T_{qf}s}{1 + T_1s} \Delta f(s) + \frac{k_{qu} + T_{qu}s}{1 + T_1s} \Delta U(s)$$

Teist järku ülekandefunktsioon:

$$\frac{\Delta P(s)}{\Delta U(s)} = \frac{k_{pu}(1 + T_{3p}s)}{(1 + T_{1p}s)(1 + T_{2p}s)} \quad (2.19)$$

$$\frac{\Delta Q(s)}{\Delta U(s)} = \frac{k_{qu}(1 + T_{3q}s)}{(1 + T_{1q}s)(1 + T_{2q}s)}$$

Kolmandat järku ülekandefunktsioon:

$$\frac{\Delta P(s)}{\Delta U(s)} = \frac{K(1 + T_{4p}s)(1 + T_{5p}s)}{(1 + T_{1p}s)(1 + T_{2p}s)(1 + T_{3p}s)} \quad (2.20)$$

$$\frac{\Delta Q(s)}{\Delta U(s)} = \frac{K(1 + T_{4q}s)(1 + T_{5q}s)}{(1 + T_{1q}s)(1 + T_{2q}s)(1 + T_{3q}s)}$$

On kindlaks tehtud, et dünaamiliste siirdeprotsesside korral annavad paremaid tulemusi teist ja kolmandat järku mudelid.

Edasi vaadeldakse konkreetsemat juhtu ning leitakse tarbijagruppide tarbimisandmete ja kirjanduses toodud pingetundlikkustegurite alusel Sikassaare alajaama teoreetilised koormuse pingetundlikkustegurid. Samuti antakse ülevaade alajaamaga ühenduses olevatest tootjatest.

### 2.3. Koormusklasside osakaalude määramine Sikassaare alajaamas

Agregeritud sõlmekoormuse pingetundlikkuse määramiseks tuleb teada, mis tüüpi tarbijad ning tootjad antud sõlme ühendatud on. Antud töös uuritava Sikassaare 110/35/10 kV alajaama kahe trafo toitel on 2017. a märtsi seisuga kokku 13755 klienti. Elektrilevi jaotab kõik tarbijad kaugloetavate arvestite ning klientide kuunäitudest saadavate andmete alusel viide tüüpgrupp, milledeks on: [28]

1. Kodutarbijad: eramud, korterelamud, suvilad
2. Põllumajandus: karjakasvatus, taimekasvatus, kalandus
3. Teenindus: kontorid, kaubandus, teenindus, tervishoid, muu
4. Tööstus: tööstus, transport, transpordibaasid
5. Avalik: ühiskondlikud hooned

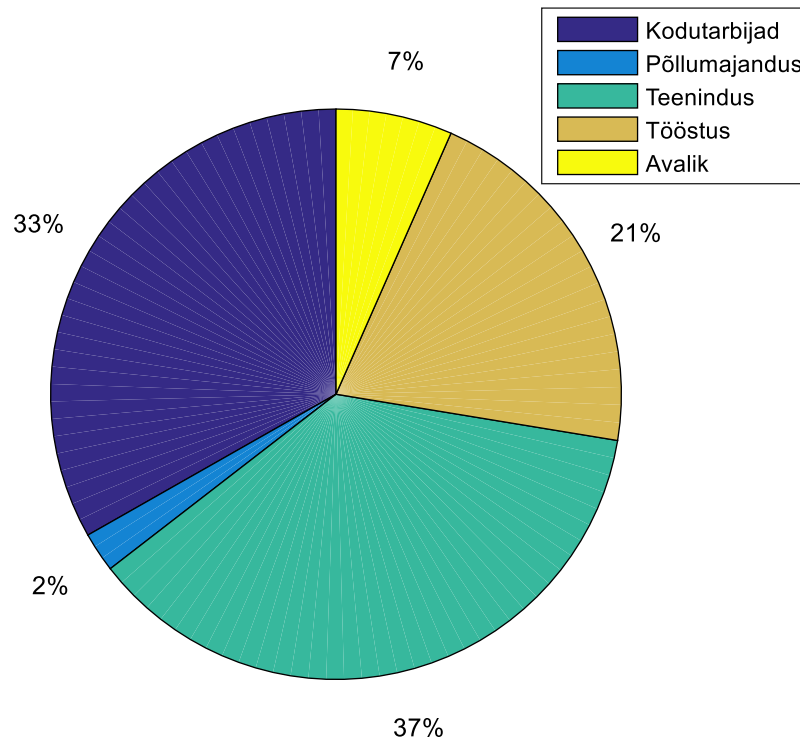
Lisas 1 on toodud detailsemalt lahti välja tooduna ka igasse tüüpgrupp kuuluvad alamgruppid.

Erinevate tüüpgruppide omavahelise osakaalu määramiseks kasutatakse antud töös Elektrilevi poolt edastatud Sikassaare 110/35/10kV alajaama tarbimisandmeid koormusklasside lõikes kuude kaupa ajavahemikus jaanuar 2012 kuni september 2015. Kuna reaalsed mõõtmised alajaamas tehakse aprilli kuus, siis kasutatakse tüüpgruppide osakaalude määramiseks aprilli kuu tarbimisandmeid. Vaadeldakse aastate 2013 kuni 2015 tüüpgruppide osakaalu kogutarbimisse ning leitakse iga tüüpgrupi keskmine osakaal. Aastat 2012 ei vaadelda, kuna selle aasta andmed erinesid oluliselt kõigist ülejäänutest- kogu tarbitud energiakogus aprilli kuus oli pea poole väiksem võrreldes ülejäänud aastatega. Viga on tingitud sellest, et tunnikoormuste andmetabelis, mida kasutati tüüpgruppide poolt tarbitava energiakoguse leidmisel, ei olnud sisse arvestatud kaugloetava arvestita klientide estimateeritud koormusandmeid, ning seetõttu ei kajastu 2012.a andmetes kogu tarbitud energia. [22, 29]

Alljärgnevas tabelis 2.2 on toodud aastate 2013-2015 aprilli kuu tarbijate tüüpgruppide tarbimisandmed ning tüüpgruppide keskmine osakaal kogutarbimisse. Tabelist selgub, et kõige suurema tarbimisega on Sikassaare alajaamas tüüpgrupp 3 ehk teenindus ja kaubandus ligi 36,9%-ga kogutarbimisest. Neile järgneb tüüpgrupp 1, milleks on kodutarbijad 33,2%-ga. Edasi tuleb tüüpgrupp 4 ehk tööstustarbijad. Tööstustarbijate osakaaluks on keskmiselt 21,0% kogutarbimisest. Oluliselt väiksema osatähtsusega on tüüpgrupid 5 ja 2 ehk ühiskondlikud hooned ning põllumajandus. Nende tarbimise osakaaluks on vastavalt ligikaudu 6,6% ja 2,3%.

**Tabel 2.2. Sikassaare 110/35/10 kV alajaama tarbijate tüüpgruppide keskmine osakaal aprillis**

Tüüpgrupp	Tüüpgrupi tarbimine, MWh				Osakaal, %
	2013	2014	2015	Kokku	
1	3074	2882	3063	9019	33,22
2	223	196	194	612	2,26
3	3438	3284	3304	10025	36,93
4	2054	1830	1815	5699	20,99
5	628	587	576	1792	6,60
∑	9417	8779	8951	27147	100



*Joonis 2.3 Sikassaare 110/35/10 kV alajaama tarbijate tüüpgruppide keskmine osakaal aprillis*

## 2.4. Resulteeruva pingetundlikkuse leidmine

Kogu sõlme resulteeruva pingetundlikkuse leidmiseks kasutatakse eelmises punktis välja arvatatud tarbijate tüüpgruppide osakaalusid. Protsentuaalsed osakaalud korrutatakse iga tüüpgrupi teoreetilise aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkuse teguriga ning saadud tulemused summeeritakse. Nii saadakse sõlme resulteeruvad summaarsed koormuse pingetundlikkustegurid.

Kirjanduses on toodud teoreetilisi koormuse pingetundlikkustegurite väärtuseid. Antud töös kasutatakse allikast [6] pärinevaid andmeid. Tabelis 2.3 on toodud antud materjalist pärinevad koormuse pingetundlikkustegurid.

**Tabel 2.3. Pingetundlikkustegurite väärtused allika [6] kohaselt**

Tüüpgrupp		Võimsustegur	dP/dU	dQ/dU	dP/df	dQ/df
Kommunaalkoormus						
	suvi	0,9	1,2	2,9	0,8	-2,2
	talv	0,99	1,5	3,2	1	-1,5
Kommertsikoormus						
	suvi	0,85	0,99	3,5	1,2	-1,6
	talv	0,9	1,3	3,1	1,5	-1,1
Tööstuskoormus		0,85	0,18	6	2,6	1,6
Elektrijaama omatarve		0,8	0,1	1,6	2,9	1,8

Nagu ülaltoodud tabelist selgub ei ole toodud eraldi põllumajanduse pingetundlikkustegureid. Seetõttu arvestan antud tüüpgrupi pingetundlikkustegurid samaks tööstuskoormuselgi. Kuna põllumajanduse osakaal on nii väike, siis sellest arvestatavat viga ei kujune.

Summaarseks aktiivkoormuse pingetundlikkusteguriks kujunes arvutuste tulemusel 1,106 ning reaktiivkoormuse pingetundlikkusteguriks 3,807 .

## 2.5. Tootjad

Sikassaare 110/35/10 alajaamas on Eesti jaotusvõrgus kõige suurema osakaaluga hajatootjaid suhtega alajaama kogukoormusesse. Seetõttu osutuski antud alajaam sobivaks uurimisobjektiks antud lõputöö raames.

Sikassaare alajaama 10 kV jaotlasse on ühendatud Elektrilevi infosüsteemide kohaselt kokku üle 15,8 MW võimsusega hajatootmisseadmeid. 15,8 MW hulka ei ole arvestatud uuritava alajaamaga seotud mikrotootjaid, kellede installeeritud koguvõimsus oli 2017. a alguse seisuga 162,6 kW. Kokku on Sikassaare alajaama toitel 17 mikrotootjat, kelle kõigi võimsused jäävad alla 11 kW ning kelle liitumised on madalpingel. 2 mikrotootjat toodavad elektrienergiat kasutades tuulegeneraatorit, ülejäänud kasutavad päikesepaneele. Kõik mikrotootjad on võrku ühendatud läbi konverteri. [30]

Sikassaare alajaama 35 kV sektsiooni toitele on ühendatud kokku 7,6 MW võimsusega hajatootjaid. Sikassaare alajaama toitel oleva Nasva alajaamaga on ühendatud kaks 0,8 MW

tuulegeneraatorit ja samuti läbi 35 kV võrgu Sikassaare piirkonnaalajaama toitel oleva Läätsa alajaamaga on ühendatud üks 3 MW ja kuus 0,5 MW tuulegeneraatorit.

Sikassaare alajaama 10 kV sektsioonidesse on ühendatud kokku 8,2 MW tootmiseseadmeid. Suurema osa moodustavad neist jällegi tuulegeneraatorid. Teise sektsioon on ühendatud kolm 0,5 MW võimsusega tuulegeneraatorit. Esimeses sektsioonis on aga kaks tuulegeneraatorit võimsustega 2,3 MW ja 2,0 MW, kusjuures viimase võimsus on piiratud 3,2 MW pealt 2,0 MW peale. Lisaks on esimeses sektsiooni toitel veel 2,4 MW võimsusega koostootmisjaam.

Sikassaare alajaamaga ühendatud hajatootmiseseadmete liitumine on kõigil keskpingel, kuid tootmiseseadmed töötavad madalpingel. Seetõttu on kõik alajaamaga ühendatud läbi vähemalt ühe trafo.



## 3. Modelleerimine ja anlüüs programmpaketis

### PSCAD/EMTDC

Hajatootjate mõju uurimiseks elektrivõrgu sõlmekoormusele viidi PSCAD/EMTDC programmis läbi viis simulatsiooni, mille käigus uuriti aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkustegurite sõltuvust hajatootjate osakaalust ja nende võimsustegurist. Läbi viidud simulatsioonid on järgnevad:

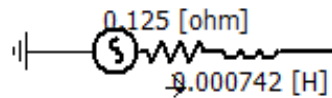
- Trafole mõjuvate resulteerivate koormuse pingetundlikkustegurite leidmine erinevate hajatootjate osakaalude korral võimsusteguriga  $\cos \varphi=1$
- Tegelik tarbimise alusel koormuse pingetundlikkustegurite leidmine erinevate hajatootjate osakaalude korral võimsusteguriga  $\cos \varphi=1$
- Trafole mõjuvate resulteerivate koormuse pingetundlikkustegurite leidmine erinevate hajatootjate osakaalude korral võimsusteguriga  $\cos \varphi=0,8$
- Tegelik tarbimise alusel koormuse pingetundlikkustegurite leidmine erinevate hajatootjate osakaalude korral võimsusteguriga  $\cos \varphi=0,8$
- Trafole mõjuvate resulteerivate koormuse pingetundlikkustegurite leidmine erinevate koormuse pingetundlikkustegurite korral võimsusteguriga  $\cos \varphi=1$

Antud simulatsioonid on eesmärgiga uurida hajatootmiseadmeid nende kõige levinumas juhtimisrežiimis kasutades erinevaid mõõteandmeid- leitakse nii trafo koormuse alusel trafole kui elektrivõrgu sõlmele mõjuvad koormuse pingetundlikkustegurid kui ka kogu tarbimise alusel kogukoormuse pingetundlikkustegurid valideerimaks pingetundlikkustegurite leidmise meetodikat. Katseid tehti erinevate võimsusteguritega kinnitamaks, et nii aktiiv- kui ka reaktiivvõimsuse pingetundlikkustegurid käituvad sarnaselt. Viimase katse käigus uuritakse kuidas mõjutab hajatootjatega sõlmes koormuse enda pingetundlikkus trafole mõjuvat resulteerivat koormuse pingetundlikkust.

#### 3.1. Katse mudel

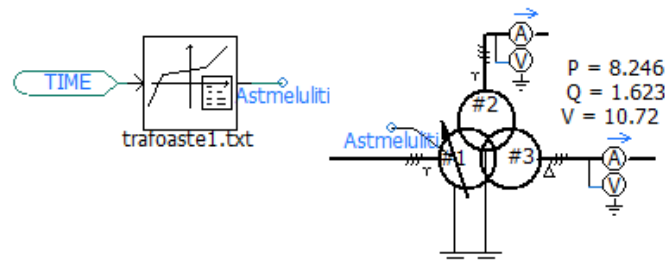
Modelleerimaks hajatootjate mõju agregeeritud sõlmekoormusele loodi programmis PSCAD/EMTDC suure hajatootjate osakaaluga Sikassaare alajaama 10 kV esimese sektsiooni mudel. Suurematest hajatootjatest on Sikassaare alajaama esimesse sektsiooni ühendatud kaks tuulegeneraatorit võimsustega 2,3 MW ja 2,0 MW ning üks koostootmisjaam elektrilise võimsusega 2,4 MW. Väikeseid mikrotootjaid mudelis arvesse ei ole võetud.

Sikassaare alajaama toitev võrk on kujutatud pingevallika mudeli *Voltage Source Model 2* ning jadamisi ekvivalentse takistusena  $0,125+j0,233$ . Toitava võrgu ekvivalentne takistus on saadud Elektrilevi OÜ Sikassaare alajaama lühisvoolude tabelist. Alajaama toitva võrgu aseskeem on toodud joonisel 3.1.



**Joonis 3.1. Sikassaare 110/35/10 alajaama toitva võrgu aseskeem**

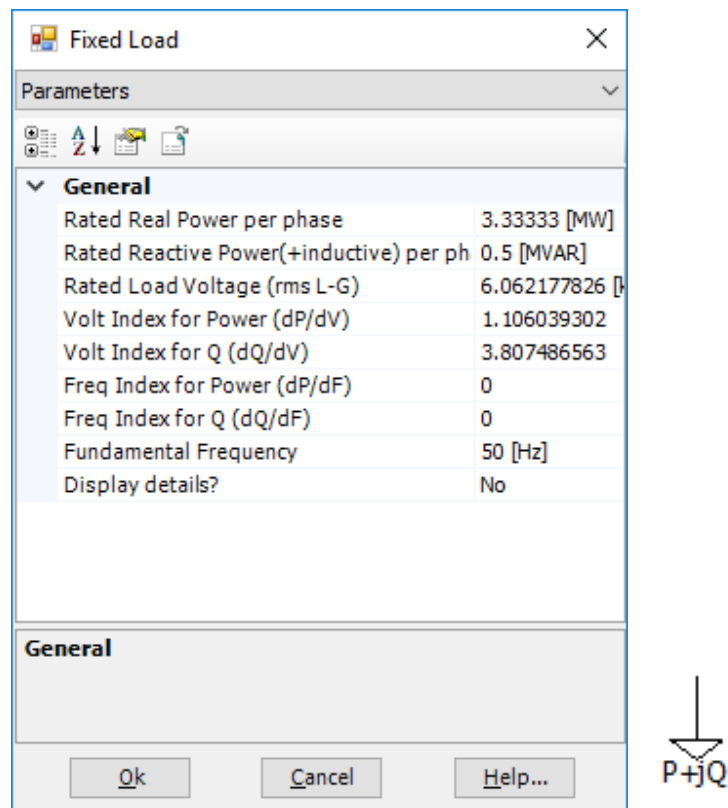
Edasi on mudelis toodud Sikassaare alajaama 16 MVA trafo C1T ja esimese sektsiooni latid. Tegemist on kolmemähiselise trafoga, aga kuna 35 kV võrku ei modelleerita ning normaalskeemi kohaselt on 35kV võrk teise trafo C2T toitel siis ei ole C1T 35 kV õlga peale pinget mõõtmiseks kasutatava multimeetri rohkem midagi ühendatud. Trafo 110 kV ja 35 kV mähised on tähtühenduses ja 10 kV mähis kolmnurkühenduses, nagu see eesti elektrivõrkudes tavaliselt on. Mudelis muudetakse pinget trafo astme muutmise kaudu. Antud trafol on 16 astet ning iga astme suurus on 1,78% nimipingest. Trafo astme muutmise on kirjutatud tekstifaili, kust mudel võtab lähteandmed ning muudab vastavalt sisestatud andmetele ette antud viitega trafo astet. Trafo astme muutmiseks loodud skeem ja trafo enda mudel on toodud joonisel 3.2.



**Joonis 3.2. Trafo mudel ja trafoastme juhtimise skeem**

Esimese sektsiooni 10 kV lattidele on ühendatud alajaama agregeeritud koormus ning hajatootmisseadmed. Agregeeritud koormuse modelleerimiseks on kasutatud PSCAD-i koormuse eksponentmudelit *Fixed Load*. Mudeli parameetritena saab kindlaks määrata koormuse aktiiv- ja reaktiivkomponendid, aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkustegurid, milleks määrati eelmises punktis leitud Sikassaare alajaama koormuse summaarsed aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkustegurid. Samuti määratakse mudelis ära koormuse sagedustundlikkustegurid ning koormuse nimi(faasi)pinge. Nii koormuse pinge- kui ka

sagedustundlikkustegureid saab määrata PSCAD-is piirides -5...5. Koormuse mudel ja selle parameetrid on toodud joonisel 3.3

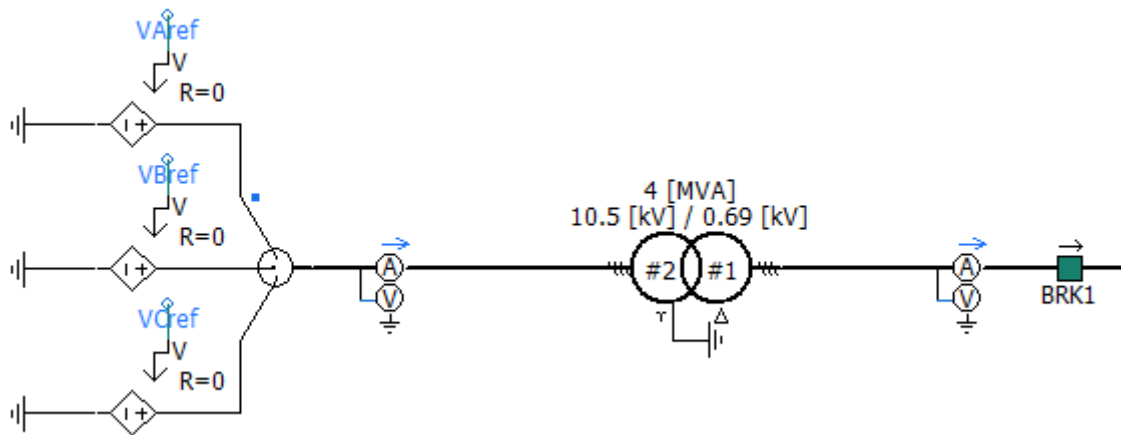


**Joonis 3.3. Fixed Load parameetrite aken ja tingmärk**

Sikassaare 10 kV I sektsiooni lattidele on ühendatud ka hajatootjad. Kaks tuulikut koguvõimsusega 4,3 MW on ühendatud paralleelselt, kuna alajaamas reaalselt on nad ühendatud ühte fiidrisse. Lisaks on veel kolmas hajatootja, milleks on koostootmisjaam, mis on ühendatud samuti alajaama 10 kV lattidele.

Kuna kõik hajatootjad toodavad võrku ainult aktiivvõimsust ning kogu vajamineva reaktiivvõimsuse kompenseerivad kohapeal, siis on õigustatud nende modelleerimine pingetundlikkustegurite leidmiseks ühesuguselt ideaalsete voolualliatena, mille parameetreid juhitakse pinge järgi. Hajatootjad on modelleeritud kolme ühefaasilise vooluallikana, mille pinget juhib juhtimisalgoritm. Kuna hajatootjate generaatorid töötavad madalpingel, siis on mudelisse lisatud ka trafo, mis tõstab pinge võrgupinge tasemele. Lisatud on veel multimeetrid trafode ülem- ja alampingemähiste juurde, mis mõõdavad pingeid, aktiiv- ja reaktiivvõimsusi. Hajatootja üldskeem ilma juhtimisalgoritmiga võrgu mudelis on toodud joonisel 3.4. Antud joonisel on toodud üks hajatootja, milleks antud näites on 2 MW peale

piiratud tuulik. Võrgu mudelis on kokku kolm hajatootjat, kes kõik on modelleeritud sarnaselt, erinevusteks on vaid trafode andmed ning kõigil kolmel on eraldiseisev juhtimine.



**Joonis 3.4. Hajatootjate üldskeem ilma juhtimisalgoritmiga**

Kõiki hajatootjaid juhib PSCADis leitavatest elementidest loodud juhtimisalgoritm, mis on toodud joonisel 3.5. Igal hajatootjal on oma maksimaalne tootmisnäivvõimsus, mis on fikseeritud ja mida mudel ületada ei luba.

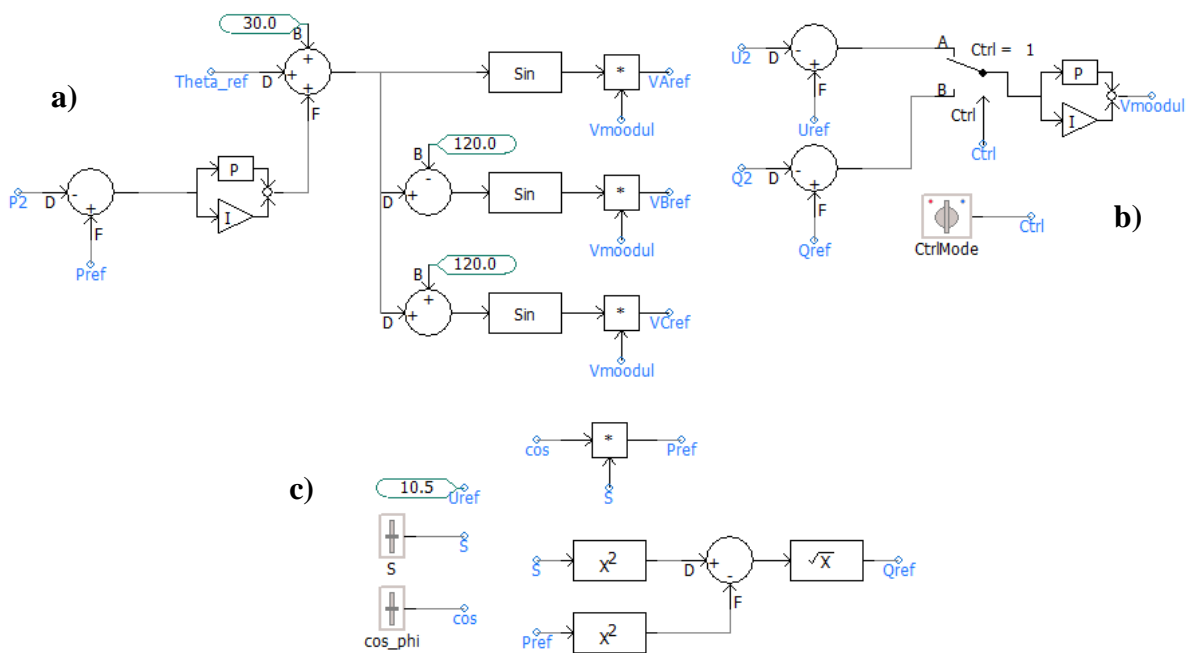
Kasutaja annab ette juhtimisrežiimi- kas pinge või  $\cos \phi$  järgi. Esimesel juhul üritab hajatootja oma väljundis etteantud pinget hoida suurendades või vähendades reaktiivvõimsuse tootmist ning muutes sellega  $\cos \phi$  väärtust vastavalt oma maksimaalvõimsusele. Teisel juhul hoiab hajatootja oma  $\cos \phi$  etteantud väärtuse juures. Mudeli simulatsioonid on olukorras, kus hajatootjad töötavad  $\cos \phi$  režiimis. Antud režiim on kõige laialdasemalt levinud hajatootjate juhtimisrežiim ja seetõttu analüüsitakse seda ka antud töös põhjalikult- simulatsioone viiakse läbi ka erinevate  $\cos \phi$  väärtuste juures. Samuti annab kasutaja ette soovitava  $\cos \phi$  väärtuse, mida tootja vastavas režiimis olles hoiab.

Kõigi kolme faasi pinge hetkväärtuste leidmise algoritm on toodud joonise 3.5 a) osas. Selles juhtimisalgoritmi osas on sisenditeks referents aktiivvõimsus, aktiivvõimsuse hetkväärtus, eelmises plokis arvutatud pingemoodul ja PLL (*Phase Locked Loop*) plokist saadud referentsnurk. Nende andmete alusel leitakse kõigi kolme faasi pingete hetkväärtused, mis on sisenditeks vooluallikate juhtimisele.

Pingemooduli amplituudväärtuse leidmise algoritm on toodud joonise 3.5 b) osas. Seal on ümberlülit, mida juhtides on võimalik lülitada  $\cos \phi$  või pinge hoidmise režiimi vahel. Õige

mooduli leidmise aluseks on PI kontrolleri, mis leiab tagasiside abil ette antud sammuga korrektse pingemooduli väärtuse.

Näivvõimsuse alusel, millel hajatootja töötab ning ette antud  $\cos \varphi$  väärtuse alusel leitakse suurused  $P_{ref}$  ja  $Q_{ref}$  ehk aktiiv- ja reaktiivvõimsused, mida hajatootja  $\cos \varphi$  režiimis hoida püüab. Selle arvutusalgoritm on toodud joonise 3.5 c) osas. Kui hajatootja on pingehoidmise režiimis, siis on talle ette antud referentspinge, mida hoida üritatakse. Antud mudelis on selleks 10,5 kV.

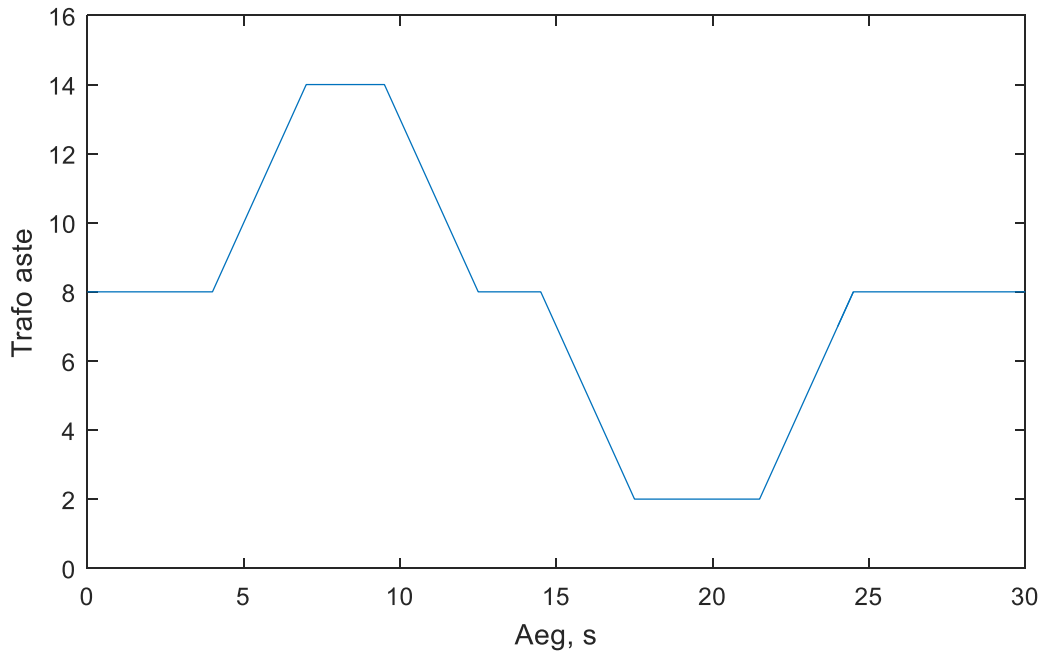


**Joonis 3.5. a) b) c) Hajatootjate juhtimisalgoritm**

Kogu mudeli tervikskeem ilma graafikuteta on toodud lisas L.2.

### 3.2. Simulatsioonid

Kõikides simulatsioonides muudetakse pinget trafo astmelülitit lülitades sama algoritmi järgi- kõigepealt töötab mudel 5 sekundit normaalolukorras. Peale seda tõstetakse trafo astet 0,5 sekundilise vahega kuue astme võrra, mis langetab sektsiooni pinget. Seejärel oodatakse 3 sekundit, et toimuks stabiliseerumine, misjärel viiakse trafo jälle keskmisele astmele ning oodatakse 3 sekundit. Seejärel langetatakse 0,5 sekundilise vahega trafo astet kuue võrra ning oodatakse 4 sekundit, misjärel taastatakse normaalolukord. Simulatsiooni kogupikkus on 30 sekundit. Trafo astme muutmist selgitav graafik on toodud järgneval joonisel 3.6.



**Joonis 3.6. Trafo astme muutmine**

### 3.2.1 Andmete töötlus

Simulatsioonides mõõdetakse pingeid modelleeritava alajaama lattidel ning aktiiv- ja reaktiivvõimsust trafo 10 kV õlas. Kahes katses mõõdetakse eraldi ka hajatootjate toodetavat aktiiv- ja reaktiivvõimsust. Tulemused eksporditakse arvutusprogrammi MATLAB, kus vabavaralise OPTI *toolboxiga* leitakse vähemruutude meetodil simulatsioonitulemuste alusel arvutuslikud pingetundlikkustegurid. MATLAB skript on toodud joonisel 3.7

Esmalt defineeritakse skriptis funktsioon, mille tegurit vähemruutude meetodil leida üritatakse. Antud juhul on selleks eksponentfunktsioon, kus otsitakse eksponentfunktsiooni astendajat, milleks ongi vastavalt sisestatud andmetele kas aktiiv- või reaktiivkoormuse pingetundlikkustegurid.

Järgmisena defineeritakse suurused *algus* ja *lopp*, milleks on andmete vahemik, mida arvutustes kasutatakse. Erinevates vahemikes tulemuste arvutamine on vajalik kontrollimaks kas kogu simulatsiooni ulatuses on pingetundlikkustegurid konstantsed. Eriti tarvilik on see juhul, kui kogu simulatsiooni ulatuses saadud tulemus on oluliselt erinev oodatavast. Samuti jäetakse arvutustest välja simulatsioonitulemuste esimesed andmerekad, kuna toimumas on veel simulatsiooni käivitamisest tingitud siirdeprotsessid- hajatootjad häälestavad end veel simulatsioonis ette antud võimsustele ning toimub ka trafode magneetimine. Need protsessid

mõjuvad negatiivselt korrektsete koormuse pingetundlikkustegurite saamisele ning seetõttu jäetakse arvutustest välja.

```
% Objective (Fitting) Function
fun = @(x,xdata)xdata.^(x);

% Paris andmed
algus=2000;
lopp=115000;
xdata_abs=U10(algus:lopp);
xbaas=mean(xdata_abs(1000:2000));
xdata=xdata_abs/xbaas;
ydata_abs=Q_trafo_10kV(algus:lopp);
ybaas=mean(ydata_abs(1000:2000));
ydata=ydata_abs/ybaas;

% Starting Guess
x0 = [1.7];

% Create OPTI Object
Opt = opti('fun',fun,'data',xdata,ydata,'x0',x0)

% Solve
[x,fval,exitflag,info] = solve(Opt)
ydata2=fun(x,xdata);
plot(ydata); hold on;
plot(ydata2); hold on;
plot(xdata); hold off;
legend('Mõõdetud', 'Arvutatud', 'Pinge')
```

### ***Joonis 3.7. Skript resulteerivate aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkuse tegurite leidmiseks***

Järgmiseks defineeritakse skriptis *xdata\_abs*-ina PSCAD-is mõõdetud pinge väärtused varasemalt *algus* ja *lopp*-uga piiratud vahemikus. Seejärel leitakse baaspinge suurus *xbaas*, mille alusel arvutatakse normeeritud pinge väärtus. Baaspinge *xbaas* leitakse ette antud vahemiku pingete keskväärtusena. Antud vahemik valitakse selliselt, et see oleks kogu ulatuses vastav normaalolukorrale, mil kõik siirdeprotsessid on lõppenud.

Jagades mõõdetud tulemused läbi baaspingega saadakse tulemuseks pinge suhtühikutes, mis on skriptis defineeritud *xdata*-na. Seda kasutatakse sisendina leidmaks vähemruutude meetodil aktiiv- või reaktiivvõimsuste pingetundlikkustegureid. Sarnaselt toimitakse ka *ydata* leidmisel, milleks on vastavalt kas aktiiv- või reaktiivvõimsused. Vahemik, mis mõõdetulemusi kasutatakse on sama nagu pinge puhulgi ja defineeritud samuti suurustega

*algus* ja *lopp*. Baasvõimsus leitakse sarnaselt baaspingele ning seejärel jagades mõõtetulemused baasvõimsusega läbi saadakse normeeritud võimus.

Järgnevalt antakse mudelile ette pingetundlikkusteguri esmane pakkumine, millest alates hakatakse õiget tulemust otsima. Mida lähemale see tegelikule väärtusele jääb, seda väiksema hulga iteratsioonidega tulemus saadakse. Seetõttu on mõistlik valida antud suurus oodatava tulemuse lähedane.

Viimaks sisestatakse *opti* funktsiooni varasemalt defineeritud suurused, mille alusel leitaksegi vähemruutude meetodil aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkustegurid. Järgnevalt on selgitatud pisut vähemruutude meetodi põhimõttest

Mittelineaarsete vähemruutude meetodit kasutatakse minimeerimaks vahet füüsiliste mõõtmiste ja matemaatilise mudeli alusel leitud tulemuste vahel. Mittelineaarsete vähemruutude optimeerimisfunktsiooni sihifunktsioon  $J(x)$  koostatakse kasutades mõõdetud ja modelleeritud võimsuste ruutkeskmist viga.

Aktiivvõimsuse modelleerimisviga  $\varepsilon_{iP}$  iga mõõtmistulemuse  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$  juures leitakse mõõdetud aktiivvõimsuse  $P_{im}$  ja simuleeritud aktiivvõimsuse  $P_{is}(x)$  vahe kaudu: [31]

$$\varepsilon_{iP} = P_{im} - P_{is}(x) \quad (3.1)$$

Mittelineaarsete vähemruutude optimeerimisfunktsiooni sihifunktsioon  $J(x)$  avaldub kui: [31]

$$\min_x J(x) = \min \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\varepsilon_{iP}]^2 = \min \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_{im} - P_{is}(x)]^2 \quad (3.2)$$

Aktiivkoormuse eksponentmudeli parameetreid leitakse järgneva optimeerimisülesande alusel: [31]

$$\min_x J(x) = \min \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_{im} - P_0 \left(\frac{U_i}{U_0}\right)^{K_{pu}}]^2 \quad (3.3)$$

Sarnaselt toimitakse ka reaktiivvõimsuse pingetundlikkuse leidmisel.  $K_{pq}$  leitakse lahendades optimeerimisülesanne: [31]

$$\min_x J(x) = \min \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Q_{im} - Q_0 \left(\frac{U_i}{U_0}\right)^{K_{qu}}]^2 \quad (3.4)$$



Lõpuks kui skript on tulemused leidnud joonestatakse ka graafik, millel on kujutatud mõõdetud pinged ja koormuse väärtused ning arvutuslikud koormuse väärtused. Kõik graafikul kujutatud väärtused on suhtühikutes.

### 3.2.2 Resulteeruvad aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkustegurid trafoiidris erinevate hajatootjate osakaalude puhul

Esimese simulatsiooni käigus üritatakse leida resulteeruvaid aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkustegureid erinevate hajatootjate osakaalude juures. Selle juures on igal katsel sama aktiiv- ja reaktiivkoormus, milleks on  $10+j1,5$  MVA, koormusel samad aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkustegurid, milleks on eelmises punktis leitud  $K_{pu}=1,106$  ja  $K_{qu}=3,807$ . Samuti töötavad kõik hajatootmisseadmed  $\cos \varphi$  režiimis tootes ainult aktiivvõimsust ehk võimsustegur  $\cos \varphi=1$ .

Katses modelleeritakse erineva hajatootjate osakaaluga stsenaariumeid. Hajatootjate võimsust tõstetakse sammuga 1 MW ning varasemalt kirjeldatud MATLAB skripti abil leitakse resulteeruvad pingetundlikkustegurid. Esimeses stsenaariumis on kõik hajatootjad välja lülitatud ning kogu koormust toidetakse trafo kaudu. Sellisel juhul ei tohiks koormuse pingetundlikkustegurid muutuda, kuna on ainult üks agregeeritud sõlmekoormus ning mingisugust tootmist, mis resulteeruvaid pingetundlikkustegureid mõjutada võiks ei ole. Eelduse kinnitamiseks simuleeriti mudel ilma hajatootjateta läbi ning mudelist pärit andmed eksporditi MATLAB-i, kus skriptiga leiti vähemruutude abil aktiiv- ja reaktiivpingetundlikkused. Tulemused on toodud tabelis 3.1

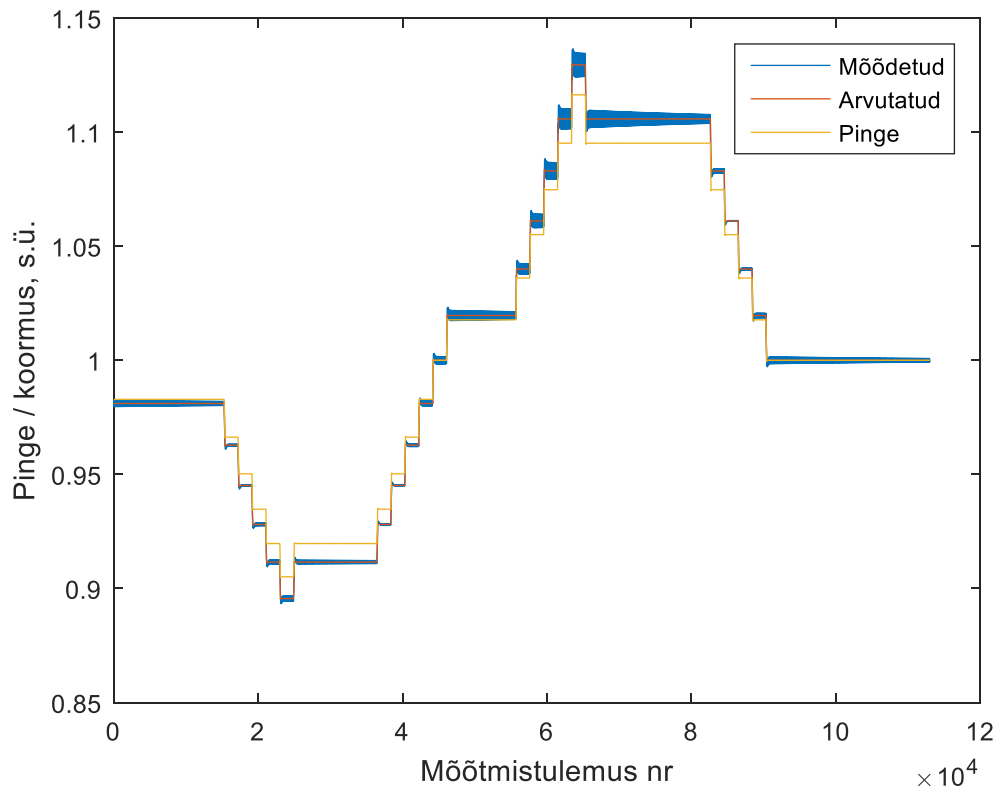
**Tabel 3.1. Koormuse pingetundlikkustegurid ilma hajatootjateta**

	$K_{pu}$	$K_{qu}$
Mudelisse sisestatud	1,1060	3,8074
Arvutuslikult leitud	1,1062	3,8053

Nagu tabelist näha on arvutuslikud koormuse pingetundlikkustegurid praktiliselt võrdsed mudelisse sisestatudega. Sellest võib järeldada, et MATLAB-i skript pingetundlikkustegurite leidmiseks mudeli mõõtetulemuste alusel töötab suure täpsusega.

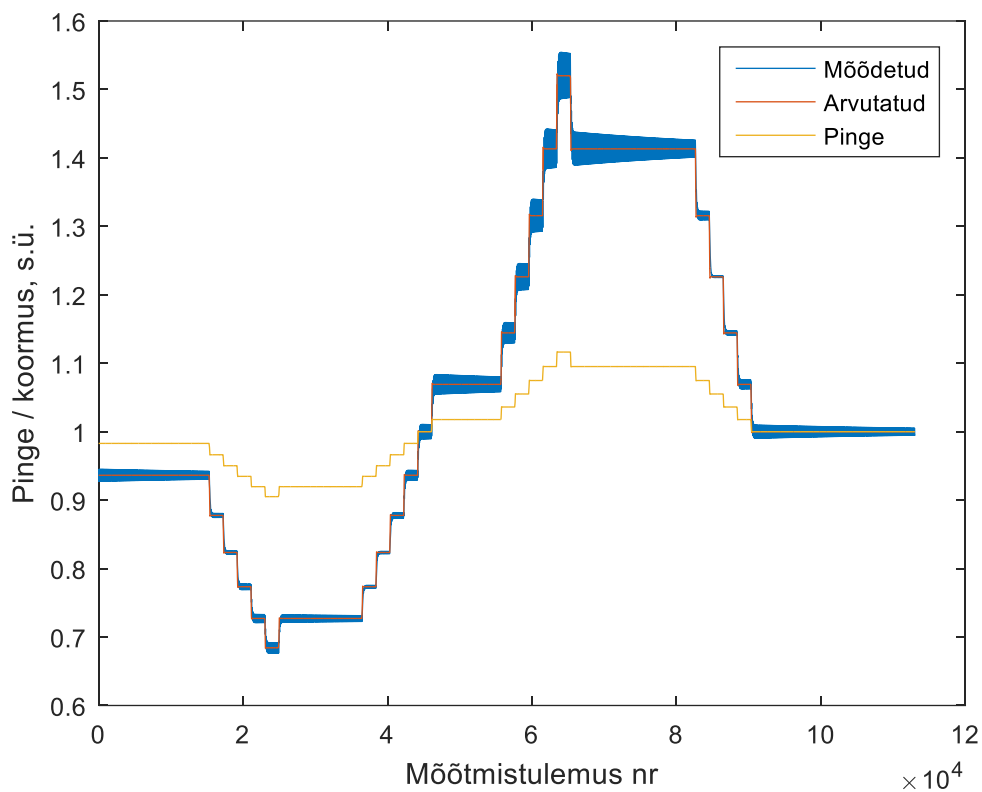
Alljärgneval joonisel 3.8 on toodud MATLAB-i skriptis leitud arvutuslik aktiivkoormus erinevatel pingetel, mudelis mõõdetud tegelik aktiivkoormus ja pinged alajaama lattidel. Kõik suurused on toodud suhtühikutes parema võrreldavuse nimel. Nagu jooniselt näha kattuvad

arvutuslikud ja mõõdetud tulemused väga hästi. Mõõdetud tulemustel on näha ka kerget võnkumist matemaatiliselt arvatud koormuse väärtuse ümber. Võnkumine küll sumbub ajas, kuid ei jõua enne järgmisi pinge muutusi veel täielikult sumbuda. Võnkumise suurem amplituud vahetult peale pinge muutust on põhjustatud mudeli hajatootjate häälestumisest uuele pingele.



**Joonis 3.8. Aktiivkoormuse väärtused modelleeritult ning eksponentmudeli alusel arvutuslikult**

Ka reaktiivkoormuse puhul klappivad arvutuslikud tulemused väga täpselt mudelisse sisestatud tulemustega, mida kinnitab ka joonis 3.8. Kuna sisestatud reaktiivkoormuse pingetundlikkustegur oli oluliselt suure aktiivkoormuse omast, siis on näha ka, et trafo reaktiivkoormus kõigub pinge muutudes olulisemalt suurema amplituudiga kui aktiivkoormus.



**Joonis 3.9. Reatiivkoormuse väärtused modelleeritult ning eksponentmudeli alusel arvutuslikult**

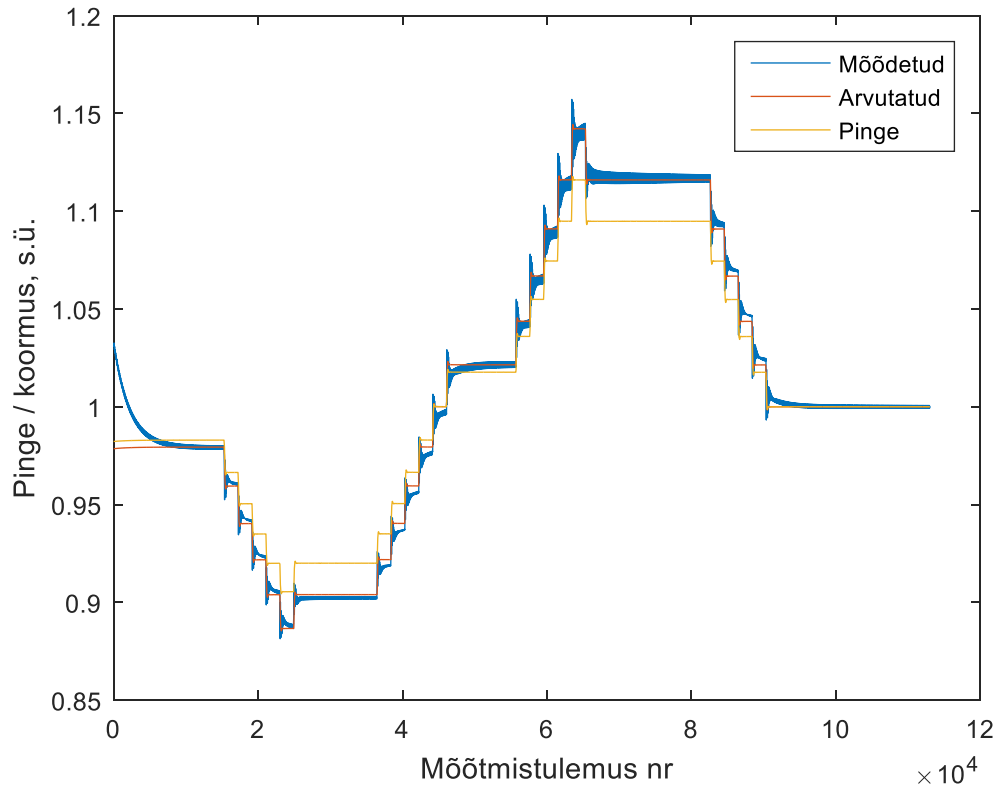
Järgmiseks suurendatakse tootmist 1 MW-ni ehk 10%-ni aktiivvõimsuse tarbimisest. Kuna hajatootjad töötavad võimsusteguriga üks, siis reaktiivvõimsust ei toodeta. Samuti sarnaselt eelmisele simulatsioonile eksporditakse PSCAD mudelist saadud andmed MATLAB-i, kus skripti abil leitakse trafo fiidrile mõjuvad summaarsed aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkustegurid.

**Tabel 3.2. Koormuse pingetundlikkustegurid hajatootjate osakaaluga 10%**

	$K_{pu}$	$K_{qu}$
Mudelisse sisestatud koormuse pingetundlikkustegurid	1,1060	3,8074
Arvutuslikult leitud trafofiidrile mõjuvad koormuse pingetundlikkustegurid	1,2112	3,8069

Nagu ülaltoodud tabelist näha on, ei ole aktiivvõimsuse pingetundlikkustegur  $K_{pu}$  enam võrdne mudelisse sisestatud väärtusega, vaid on suurenenud. Reaktiivvõimsuse

pingetundlikkustegur on aga samaks jäänud. Selleks, et saadud tulemuse õigsuses veenduda, võrreldakse mudelis mõõdetud ja arvutatud pingetundlikkustegurite alusel leitud aktiivkoormuse väärtusi. Tulemused on toodud joonisel 3.10.



**Joonis 3.10. Aktiivkoormuse väärtused modelleeritult ning eksponentmudeli alusel arvutuslikult hajatootmise 10% osakaalu juures**

Nagu ülaltoodud jooniselt selgub, langevad mõõdetud ja arvutatud aktiivkoormuse väärtused pingetundlikkusteguri  $K_{pu}=1,2112$  juures suurepäraselt kokku, mis tähendab, et trafoidrile mõjuv pingetundlikkustegur on õige väärtusega. Kuna reaktiivvõimsuse genereerimise ega tarbimise juures midegi ei muutu, siis jääb reaktiivkoormuse pingetundlikkustegur samaks.

Järgnevalt suurendatakse hajatootjate genereerimist sammuga 1 MW kuni nende maksimaalvõimsuseni jõudmiseni. Iga sammu juures leitakse koormuse pingetundlikkustegurid ning võrreldakse mõõdetud ning arvutatud tulemusi. Ülevaatlikkuse nimel ei ole välja toodud iga simulatsiooni eraldi, kõigi simulatsioonide tulemused on toodud ühtselt tabelis 3.3.

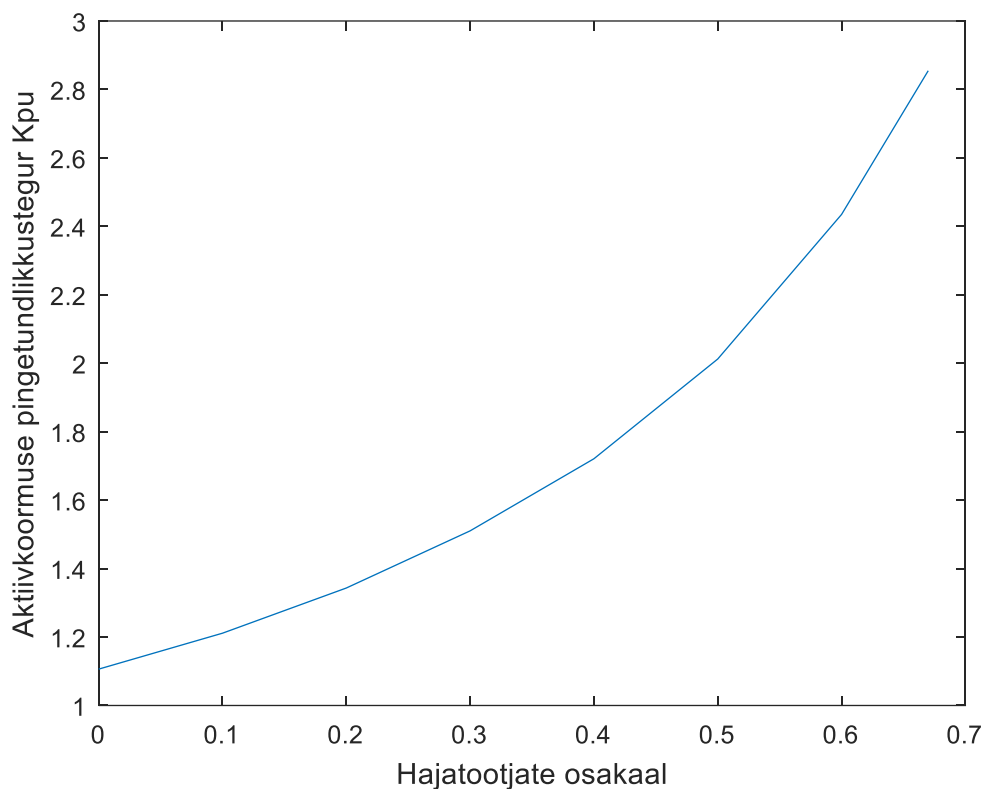
**Tabel 3.3. Aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkustegurid erinevate hajatootjate osakaalude juures**

<b>Hajatootjate osakaal</b>	<b>0%</b>	<b>10%</b>	<b>20%</b>	<b>30%</b>	<b>40%</b>	<b>50%</b>	<b>60%</b>	<b>67%</b>
$k_{pu}$ trafofiidris	1,10620	1,21120	1,34320	1,51020	1,72090	2,01230	2,43470	2,85470
Koormuse $k_{pu}$	1,10604	1,10604	1,10604	1,10604	1,10604	1,10604	1,10604	1,10604
$k_{qu}$ trafofiidris	3,80500	3,80690	3,80680	3,80710	3,80730	3,80730	3,80710	3,80730
Koormuse $k_{qu}$	3,80749	3,80749	3,80749	3,80749	3,80749	3,80749	3,80749	3,80749

Nagu ülaltoodud tabelist näha suureneb trafofiidri aktiivkoormuse pingetundlikkus hajatootjate osakaalu tõustes, samas kui reaktiivkoormuse pingetundlikkus jääb samaks. Kuna kõik modelleeritud hajatootjad töötavad võimsusteguriga üks ja toodavad ainult aktiivvõimsust, siis trafofiidri mõjuv reaktiivkoormuse pingetundlikkus hajatootjate osakaalu suurenedes ei muutu. Toodetava aktiivvõimsuse suurenedes aga suureneb trafofiidri pingetundlikkus oluliselt.

Kuna hajatootjad toodavad antud mudelis konstantset aktiivvõimsust sõltumata pingest, siis võiks neid modelleerida ka konstantse võimsuse allikana. Hajatootjate osakaalu suurenedes väheneb trafofiidri koormus, kuid pinge muutusest põhjustatud tarbimise muutuse kompenseerib sellegi poolest trafo. Seega väiksema trafo koormuse korral muutub trafo koormus protsentuaalselt rohkem, mid näitab ka suurem pingetundlikkustegur.

Trafofiidri aktiivkoormuse pingetundlikkustegur kasvab eksponentsiaalselt, mis tähendab, et kui fiidri aktiivkoormus läheneb nullile, läheneb aktiivkoormuse pingetundlikkustegur lõpmatusele. Joonisel 3.11 on toodud antud simulatsioonis leitud aktiivkoormuse pingetundlikkusteguri sõltuvus hajatootjate osakaalust.



*Joonis 3.11. Aktiivkoormuse pingetundlikkuse sõltuvus hajatootjate osakaalust*

### **3.2.3 Aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkustegurid erineva hajatootmise osakaalu juures leituna tegeliku tarbimise alusel**

Kui eelmises katses leiti trafofiidrile mõjuv pingetundlikkustegur trafo koormuse ja sektsiooni pinge alusel, siis antud punktis leitakse aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkustegurid tegeliku koormuse alusel.

Tegeliku koormuse leidmiseks liidetakse trafo koormusele otsa kõigi hajatootjate poolt toodetud võimsused. Hajatootjad töötavad  $\cos \varphi$  režiimis ja toodavad antud simulatsioonis samuti ainult aktiivvõimsust ehk nende võimsustegur  $\cos \varphi$  on üks. Samuti jääb alajaama lattidele agregeeritud koormus simulatsioonide vältel konstantseks  $10+j1,5$  juurde. Trafo astmelüliti lülitatakse sama algoritmi järgi nagu varasemaltki.

Esmalt simuleeritakse taaskord läbi olukord, kus hajatootjate osakaal on null. Seetõttu võrdub tegelik tarbitav koormus trafofiidri koormusega ja simulatsiooni tulemused on identsed eelmise punkti omadega. Seetõttu tulemusi uuesti detailselt välja toodud ei ole.

Teises simulatsioonis suurendatakse hajatootjate tootmisvõimsust 1 MW-ni ehk nende tootmise osakaalu suurendatakse 10%-ni kogutarbimisest. Peale PSCAD-is mõõdetud simulatsiooniandmete eksportimist MATLAB-i ja seal skripti alusel aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkustegurite määramist selgub, et mõlemad pingetundlikkustegurid jäävad samaks võrreldes olukorraga, mil hajatootjaid ühendatud ei olnud. Aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkustegurid ei muutu ka teiste simulatsioonide jooksul sõltumata hajatootjate osakaalust. Tulemused on toodud tabelis 3.4.

Näha on, et igas simulatsioonis on aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkusteguri praktiliselt võrdsed sisestatutega. Väike vahe tekib sisse ainult sellest, et MATLAB-i antud funktsiooniga ei ole võimalik nii mitme komakoha täpsusega tulemust saada. Viga sisestatud ja arvutuslike tulemuste vahel jääb kõige ekstreemsemal juhul alla 0,06 protsendi.

**Tabel 3.4. Koormuse pingetundlikkustegurid leituna tegeliku koormuse alusel**

<b>Tootjaid , %</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>67</b>
K <sub>pu</sub> arvutatud	1,1061	1,1061	1,1061	1,1062	1,1061	1,1061	1,1060	1,1059
K <sub>pu</sub> tegelik	1,1060	1,1060	1,1060	1,1060	1,1060	1,1060	1,1060	1,1060
K <sub>qu</sub> arvutatud	3,8056	3,8056	3,8056	3,8053	3,8057	3,8058	3,8057	3,8060
K <sub>qu</sub> tegelik	3,8075	3,8075	3,8075	3,8075	3,8075	3,8075	3,8075	3,8075
$\frac{K_{pu} \text{ arvutatud}}{K_{pu} \text{ tegelik}}$	1,0001	1,0001	1,0001	1,0001	1,0001	1,0001	1,0000	0,9999
$\frac{K_{qu} \text{ arvutatud}}{K_{qu} \text{ tegelik}}$	0,9995	0,9995	0,9995	0,9994	0,9995	0,9996	0,9995	0,9996

Antud katse tulemused kinnitavad, et teades lisaks trafo koormusele veel toodetavat võimsust on võimalik ükskõik missuguse tootmise osakaalu juures leida koormuse pingetundlikkustegurid.

### **3.2.4 Trafole mõjuvate aktiiv- ja reaktiivpingetundlikkuste leidmine sõltuvalt hajatootjate osakaalust võimsusteguriga 0,8**

Kolmandas katses jäeti taaskord kõigi simulatsioonide juures alajaama lattidele agregeeritud koormus muutumatuks 10 MW ja 1,5 Mvar juurde. Ka trafo astet muudeti sama algoritmi kohaselt nagu eelnevates katseteski. Muudeti aga hajatootjate töörežiimi- varasemalt ainult

aktiivvõimsust tootnud hajatootjad toodavad käesolevas katses ka reaktiivvõimsust. Kõigis simulatsioonides töötavad nüüd hajatootjad  $\cos \varphi$  režiimis võimsusteguriga  $\cos \varphi=0,8$ .

Taaskord tõsteti hajatootjate osakaalu nullist nende maksimaalvõimsuseni sammuga 1 MVA. Esimene simulatsioon, mille korral kõik hajatootjad välja olid lülitatud oli taaskord identne kahe eelmisega- trafofiidrile mõjuvad resulteeruvad pingetundlikkustegurid olid taaskord võrdsed koormuse pingetundlikkusteguritega.

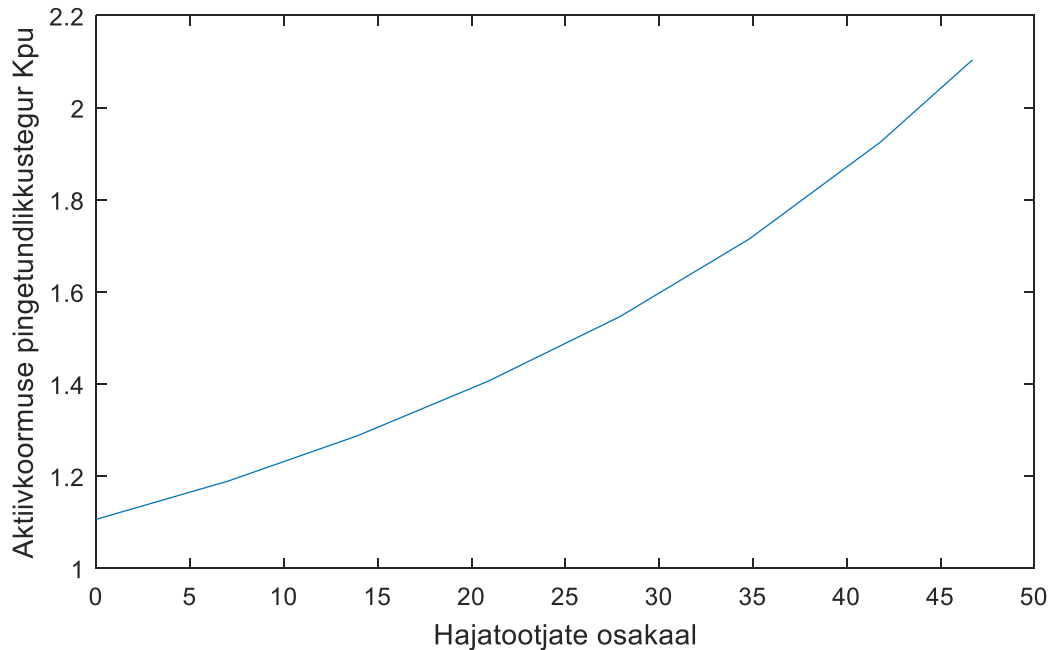
Järgmistes simulatsioonides suurendati hajatootjate näivvõimsust 1 MVA kaupa. Sellega seoses suurenesid ka toodetud aktiiv- ja reaktiivvõimsused. Samuti muutusid koormuse pingetundlikkustegurid. Simulatsioonide tulemused on kokkuvõtvalt näha tabelis 3.5.

***Tabel 3.5. Aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkustegurid hajatootjate võimsusteguri 0,8 korral***

<b>Gen, MVA</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>6,7</b>
Tootjate osakaal, %	0	7,0	13,9	20,9	27,9	34,8	41,8	46,7
Kpu arvutatud	1,1063	1,1888	1,2873	1,4063	1,5461	1,7147	1,9252	2,1035
Koormuse Kpu	1,10604	1,10604	1,10604	1,10604	1,10604	1,10604	1,10604	1,10604
Kqu arvutatud	3,8041	5,6107	9,9378	-29,0535	-8,804	-5,6015	-4,1252	-3,4919
Koormuse Kqu	3,80749	3,80749	3,80749	3,80749	3,80749	3,80749	3,80749	3,80749

Nagu tabelist 3.5 ja jooniselt 3.12 näha aktiivkoormuse pingetundlikkustegurid taaskord hajatootjate osakaalu suurenemisel eksponentsiaalselt. Aktiivkoormuse pingetundlikkustegur ei suurene enam siiski nii suure väärtuseni kui esimeses katses, sest hajatootjad toodavad antud katsetes ka reaktiivkoormust ning saavutavad oma maksimaalvõimsuse väiksema toodetava aktiivvõimsuse juures.





**Joonis 3.12. Aktiivkoormuse pingetundlikkustegur erinevate hajatootmise osakaalude juures võimsusteguriga 0,8**

Oluliselt huvitavamaid tulemusi on näha aga reaktiivkoormuse pingetundlikkusteguri juures, mida võib näha tabelist 3.5 ja jooniselt 3.13. Nimelt kasvab see eksponentsiaalselt, kuid oluliselt suurema kiirusega kui aktiivvõimuse pingetundlikkustegur. Seejärel muutub see genereeritava näivvõimsuste tõustes 2 MVA-lt 3 MVA-ni negatiivseks, kusjuures negatiivne reaktiivvõimsuse pingetundlikkustegur on võrreldes kõigi teiste katsetega äärmiselt suure absoluutväärtusega- ühegi teise katse puhul pole ükski pingetundlikkustegur veel ligilähedaseltki nii suure pingetundlikkusega olnud.

Saadud tulemused on seletatavad sellega, et kuna tarbitav reaktiivvõimsus on tarbitavast aktiivvõimsusest oluliselt väiksem, siis antud katses toodavad hajatootjad ühel hetkel rohkem reaktiivvõimsust kui koormuse poolt ära tarbitakse. Seetõttu väheneb ka trafofiidri reaktiivkoormus kuni ühel hetkel muutub reaktiivvõimsuse suund ning reaktiivvõimsus hakkab liikuma suunaga trafosse. Sellest lähtuvalt muutub ka pingetundlikkusteguri märk negatiivseks. Vahemikus, kus trafo reaktiivkoormus on aga nullilähedane, on reaktiivkoormuse pingetundlikkustegur suure absoluutväärtusega.

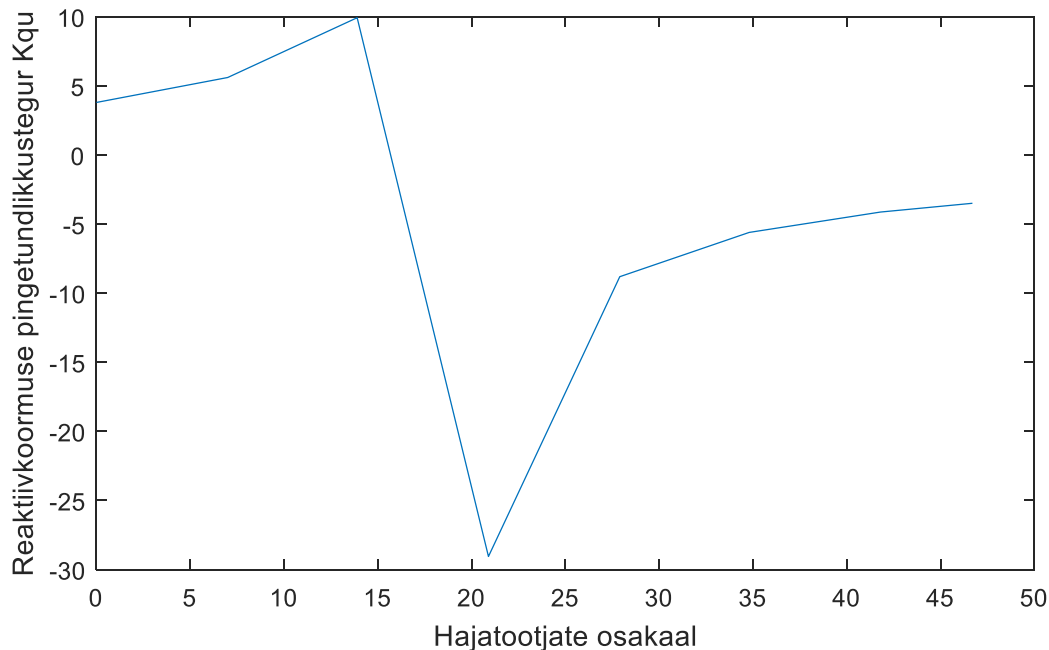
Antud katse puhul muutub trafofiidri koormus normaalolukorras nulliks, kui hajatootjate summaarne võimsus on:

$$\frac{Q}{S_{hajatootjad}} = \sin(\arccos(0,8)) \Rightarrow S_{hajatootjad} = \frac{Q}{\sin(\arccos(0,8))} = \frac{1,5}{0,6} \quad (3.5)$$

$$= 2,5 \text{ MVA}$$

Ülaltoodud tulemusest on selgelt näha, et hajatootjate näivvõimsuste 2 MVA ja 3 MVA vahel, täpsemalt võimsuse 2,5 MVA juures muutub toodetav reaktiivvõimsus suuremaks tarbitavast ning reaktiivvõimsus hakkab liikuma suunaga trafosse, mida tõestasid ka simulatsioonitulemused.

Aktiivkoormuse pingetundlikkus käitub samamoodi kui reaktiivvõimsuse pingetundlikkuski antud katses juhul kui toodetav aktiivvõimsus ületaks tarbitava. Mudeli praeguste andmetega see aga ei juhtu, kuna hajatootjad saavutavad enne oma maksimaalvõimsuse kui nende poolt toodetav aktiivvõimsus tarbitavat aktiivvõimsust ületab.



*Joonis 3.13. Reaktiivvõimsuse pingetundlikkustegur erinevate hajatootmise osakaalude juures võimsusteguriga 0,8*

### **3.2.5 Aktiiv- ja reaktiivpingetundlikkuste leidmine tegeliku koormuse alusel sõltuvalt hajatootjate osakaalust võimsusteguriga 0,8**

Järgnevalt katsetati, kas toimib ka tegelike koormuse pingetundlikkustegurite leidmine hajatootjate võimsusteguri  $\cos \varphi = 0,8$  korral. Selleks simuleeriti mudel taas 8 korda läbi tõstes hajatootjate näivvõimsust nullist maksimaalkoormuseni sammuga 1 MVA. Hajatootjad

töötasid antud katses võimsusteguriga 0,8 ning koormus oli jätkuvalt kõigi simulatsioonide vältel väärtuse 10+j1,5 juures. Erinevalt eelmisest katses mõõdeti aga lisaks trafo koormusele ka toodetavat võimsust kõigi hajatootjate juurest. Seejärel summeeriti toodetud aktiiv- ja reaktiivvõimsused ning lisati need trafo koormusele. Tulemus pidi olema seega võrdne alajaama lattidele agregeeritud koormusega.

Igas simulatsioonis leiti aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkustegurid agregeeritud sõlmekoormuse ja sektsiooni pinge alusel. Oodatavalt peaksid tulemused olema võrdsed koormuse pingetundlikkusteguritega nagu teises katseski.

Esimene simulatsioon välja lülitatud hajatootjatega andis oodatult tulemuseks taas suure täpsusega koormuse pingetundlikkustegurid nagu varasemateski katsetes.

Tabelis 3.6 on selgelt näha, et suurendades hajatootjate osakaalu arvutuslikult leitud koormuse pingetundlikkustegurid ei muutu, nagu punktis 3.2.2 tehtud katseski.

**Tabel 3.6. Koormuse pingetundlikkustegurid leituna tegeliku koormuse alusel hajatootjate võimsusteguriga  $\cos \varphi = 0,8$**

<b>Gen, MVA</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>6,7</b>
Tootjate osakaal, %	0	10	20	30	40	50	60	67
$K_{pu}$ arvutatud	1,1061	1,1061	1,1061	1,1062	1,1060	1,1060	1,1061	1,1059
Koormuse $K_{qu}$	1,106039	1,1060	1,1060	1,1060	1,1060	1,1060	1,1060	1,1060
$K_{qu}$ arvutatud	3,8055	3,8055	3,8054	3,8054	3,8057	3,8057	3,8054	3,8060
Koormuse $K_{qu}$	3,807487	3,8075	3,8075	3,8075	3,8075	3,8075	3,8075	3,8075
$\frac{K_{pu} \text{ arvutatud}}{K_{pu} \text{ tegelik}}$	1,00006	1,00006	1,00006	1,00015	0,99996	0,99996	1,00006	0,99987
$\frac{K_{qu} \text{ arvutatud}}{K_{qu} \text{ tegelik}}$	0,99948	0,99948	0,99945	0,99945	0,99953	0,99953	0,99945	0,99961

Jällegi on näha, et PSCAD simulatsioonist mõõdetud andmete põhjal MATLAB-is arvutatud tulemused langevad väga täpselt kokku koormuse pingetundlikkusteguritega. Taaskord jääb viga mudelisse sisestatu ja arvutuslikult saadud suuruste vahel alla 0,06%.

Punktis 3.2.2 ning antud punktis tehtud katsetest lähtuvalt võib väita, et tootjate puhul, mis töötavad stabiilse võimsusteguriga  $\cos \varphi$  ning mis hoiavad oma väljundvõimsuse ja selle võimsusteguri konstantsena võib modelleerida konstantse võimsusena. Teades sellisel juhul trafo koormust ning tootjate poolt toodetavat võimsust, on võimalik leida koormuse pingetundlikkustegureid sõltumata tootjate osakaalust. Eriti hästi ilmestab seda antud katse reaktiivvõimsuse pingetundlikkus, mis püsis kõigi simulatsioonide jooksul stabiilsena, olgugi, et eelmises samade andmetega tehtud simulatsioonis, mõõtes pingetundlikkustegurit aga trafo koormuse alusel, muutus reaktiivkoormuse pingetundlikkustegur suurtes piirides, kuna trafo koormus lähenes nullile.

### 3.2.6 Trafole mõjuvate aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkuste leidmine erinevate koormusmudeli pingetundlikkuste korral

Viimase katsena muudeti aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkustegureid sammuga üks PSCAD-is lubatavas suurimas vahemikus -5..5. Kõigi simulatsioonide korral jäid mudelisse sisestatud tarbitav aktiiv- ja reaktiivkoormus samaks 10+j1,5 juurde. Samuti jäi konstantseks hajatootjate poolt genereeritav võimsus milleks oli 5 MW ehk 50% tarbimisest. Hajatootjad töötasid pidevalt  $\cos \varphi$  režiimis võimsusteguriga  $\cos \varphi=1$ . Simulatsioonide tulemused on näha tabelis 3.7.

**Tabel 3.7. Resulteeruvad pingetundlikkustegurid erinevate koormuse pingetundlikkustegurite korral**

Genereerimine, MW	Kpu arvutatud trafofidris	Kpu arvutatud tegelik koormuse alusel	Sisestatud Kpu	Arvutatud Kqu	Sisestatud Kqu
5	-9,3215	-5,0497	-5	-4,9927	-5
5	-7,794	-4,0597	-4	-3,9952	-4
5	-6,0744	-3,0574	-3	-2,9952	-3
5	-4,1945	-2,0594	-2	-1,9962	-2
5	-2,1685	-1,0589	-1	-0,997	-1
5	-0,1131	-0,0564	0	0,0027	0
5	1,816	0,9464	1	1,0018	1

5	3,5623	1,9499	2	2,0011	2
5	5,1512	2,953	3	3,002	3
5	6,6284	3,956	4	3,9997	4
5	8,0298	4,9582	5	4,999	5

Katse tulemustes on taaskord näha, et leides pingetundlikkustegureid tegeliku koormuse alusel langevad arvutuslikud pingetundlikkustegurid kokku koormusmudelisse sisestatud andmetega. Seega selles osas klapi kõik eelnevates katsetes saadud tulemustega. Samuti on trafo reaktiivkoormuse alusel arvutatud pingetundlikkustegurid väga lähedased mudelisse sisestatudega. Trafo reaktiivkoormuse alusel arvutatud reaktiivkoormuse pingetundlikkustegurid langevad mudelisse sisestatudega hästi kokku, sest antud simulatsioonides reaktiivvõimsuse genereerimist ei toimu.

Ainukesena erinevad mudelisse sisestatud suurustest trafo aktiivkoormuse alusel leitud aktiivkoormuse pingetundlikkustegurid. Erinevuse põhjuseks on hajatootjate poolt genereeritav aktiivvõimsus, mis suurendab pingetundlikkusteguri absoluutväärtust. Pingetundlikkusteguri absoluutväärtus suureneb, sest pinge muutudes muutub tarbitav võimsus. Hajatootjatel jääb antud režiimis oma tootmine aga konstantseks. Seega kompenseeritakse kogu koormuse muutus trafo koormuse muutusega. Mida suurem on aga hajatootjate osakaal, seda väiksemaks jääb trafo koormus ning trafo poolt kompenseeritav tarbitava koormuse muutus omab aina suuremat osakaalu trafo kogukoormusest. Ehk teisisõnu muutub suure hajatootjate osakaalu juures trafo koormus pinge muutusel protsentuaalselt oluliselt rohkem kui väikese hajatootjate osakaalu juures, mil trafo koormus on suurem.

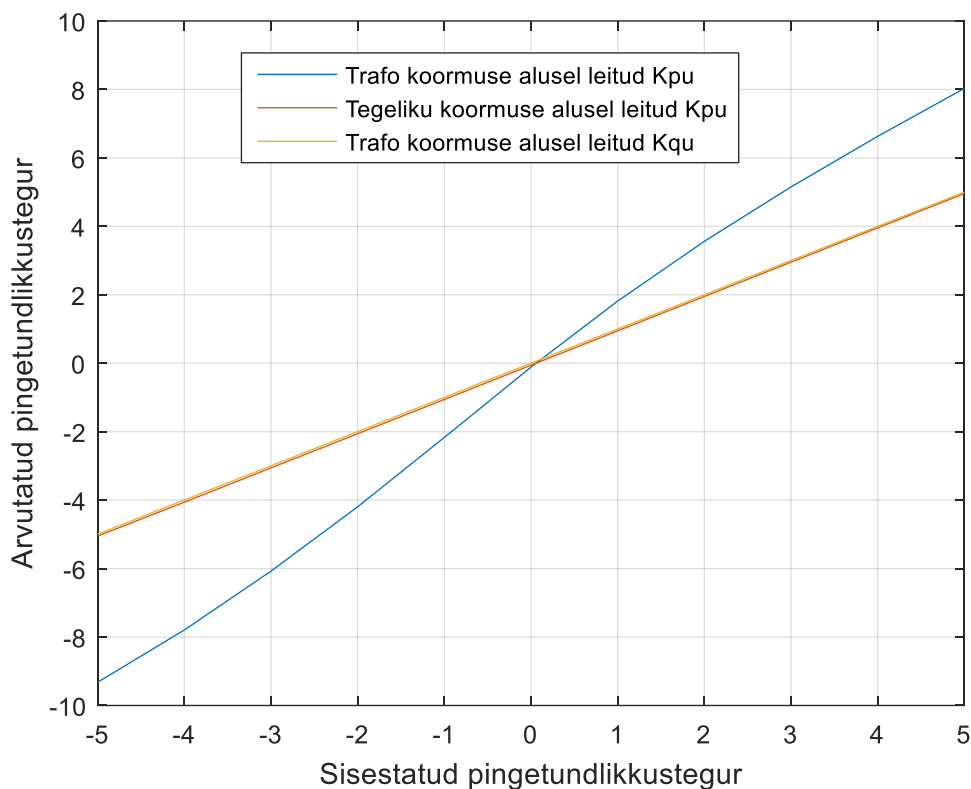
Antud katse simulatsioonides kaetakse pool tarbitavast aktiivkoormusest hajatootjate poolt genereeritava energiaga. Erinevus koormusmudelisse sisestatud pingetundlikkustegurite ja trafoidrile mõjuvate resulteerivate pingetundlikkustegurite on enamikul juhtudel ligi kahekordne. Arvutuslikult leitud ja mudelisse sisestatud aktiivkoormuse pingetundlikkustegurite suhe igas simulatsioonis on toodud tabelis 3.8.

**Tabel 3.8. Arvutusliku ja mudelisse sisestatud koormuse pingetundlikkusteguri suhe**

<b>Koormuse Kpu</b>	<b>Trafoiidrile resulteeruv Kpu</b>	<b>Arvutusliku ja mudelisse sisestatud koormuse pingetundlikkusteguri suhe</b>
-5	-9,3215	1,8643
-4	-7,794	1,9485
-3	-6,0744	2,0248
-2	-4,1945	2,09725
-1	-2,1685	2,1685
0	-0,1131	-
1	1,816	1,816
2	3,5623	1,78115
3	5,1512	1,717067
4	6,6284	1,6571
5	8,0298	1,60596

Joonisel 3.14 on toodud resulteeruva pingetundlikkusteguri väärtus erinevate mudelisse sisestatud pingetundlikkusteguri väärtuste korral. On näha, et reaktiivkoormuse ja tegeliku koormuse alusel arvutatud aktiivkoormuse pingetundlikkustegurid langevad täpselt kokku nii omavahel kui ka koormusmudelisse sisestatud suurustega.

Trafo koormuse alusel arvutatud aktiivkoormuse pingetundlikkusteguri absoluutväärtus on aga stabiilsest suurem koormusmudelisse sisestatud suurusest.



**Joonis 3.14. Resulteeruvad pingetundlikkustegurid erinevate koormuse pingetundlikkustegurite korral**

### 3.3. Analüüs

Mudeli põhjal tehtud katsetest selgub, et vähemalt ideaalsel juhul, nagu seda on mudelis, saab hajatootjaid, mis töötavad  $\cos \varphi$  režiimis modelleerida konstantse võimsusena.

Reaalses elus kõik hajatootjad suure tõenäosusega nõnda täpselt väljundvõimsust konstantsena hoida ei suuda. Kui konverterpõhiste tootjate korral on see veel mõeldav, siis näiteks otse võrku ühendatud asünkroonmootorite puhul on nende tootmisvõimuse ja võimsusteguri ideaalselt konstantsena hoidmine äärmiselt keeruline. Isegi kui kohapeal kompenseeritakse ära kogu tarbitav reaktiivvõimsus, sõltub kompenseerimise täpsus ikkagi kondensaatorpatareide minimaalsest suurusest ja juhtimise täpsusest ning kiirusest ja ei ole reaalne, et igal ajahetkel suudetakse kompenseerida kogu reaktiivvõimsus nii täpselt nagu mudelis. Paratamatult kõigub reaalsete tootmisseadmete võimsustegur rohkem kui mudelis.

Uurimaks hajatootjate mõju koormuse pingetundlikkusele on aga põhjendatud tootmisseadmete modelleerimine ideaalsetena, et teha kindlaks tootmisseadmete mõju erinevates olukordades ilma reaalsest juhtimisest tingitud ebatäpsusteta.

Kõigi katsete tulemustest selgus, et suurendades hajatootjate osakaalu, suureneb ka resuldeeruv pingetundlikkustegur trafo jaoks. See eeldab muidugi hajatootjatelt oma võimsuse pidevalt konstantsena hoidmist. Resuldeeruv (aktiiv)pingetundlikkustegur trafo jaoks suureneb eksponentsiaalselt kuni trafo (aktiiv)koormus läheb nulli. Trafo (aktiiv)koormuse lähenemisel nullile läheneb (aktiiv)koormuse pingetundlikkustegur lõpmatuseni. Kui tootmine ületab aga tarbimise ning võimsus hakkab trafosse ja sealt ülekandevõrku liikuma, muutub pingetundlikkustegur negatiivseks. Kui trafosse liikuv võimsusvoog on väike on negatiivne koormuse pingetundlikkustegur suure absoluutväärtusega. Trafosse liikuva trafost tuleva võimsusvoo suurenemisel aga väheneb koormuse pingetundlikkusteguri absoluutväärtus. Selline käitumine on omane nii aktiiv- kui ka reaktiivkoormuse pingetundlikkusteguritele.

Teiseks suuremaks järeltuleks tehtud katsetest oli, et teades trafo koormust ja toodetavaid võimsusi on võimalik kindlaks teha koormuse pingetundlikkustegurid. Selleks leitakse esmalt tegelik agregeeritud koormus antud ajahetkel summeerides tarbitavad võimsused ja trafo koormuse. Saadud tulemuse ja mõõdetud pinge alusel on võimalik siis kindlaks määrata koormuse pingetundlikkus. Saadud tulemus, nagu tehtud katsed kinnitavad, ei sõltu see siis enam hajatootjate osakaalust.



## **4. Mõõtmised Sikassaare alajaamas**

### **4.1. Katse selgitus**

Katse eesmärgiks oli uurida kuidas pinge muutus suure hajatootjatega alajaamas reaalselt koormust mõjutab. Katse teostati Sikassaare AJ I sektsioonis, muutes trafo astmelüliti abil sektsiooni pinget vahemikus 10,3 kV...10,8 kV. Piirid, mis vahemikus pinget muudeti olid Elektrilevi poolt ette antud nii, et katse käigus tarbijaid ei häiritaks.

Mõõteseade ühendati sektsiooni pingetrafoga ja trafofiidri voolutrafoga. Trafofiidrisse oli paigaldatud voolutrafo ülekandesuhtega 2500/1, kuid selle koormus oli oluliselt väiksem nimikoormusest- umbes 100 A ringis, mis tähendas, et voolutrafo oli oluliselt alakoormatud ning ei pruukinud anda tulemusi ettenähtud mõõtetäpsusega.

Peale katseseadme ühendamist mõõdeti esmalt pinget ja koormust normaalolukorras, et oleks võimalik võrrelda, mis juhtub koormusega pinge muutumisel. Seejärel tõsteti pinget trafo astmelülitiga maksimaalsele tasemele 10,8 kV juurde ning salvestati pinget ja koormuse väärtused. Peale ligikaudu 10 min möödumist langetati pinget minimaalsele lubatud tasemele 10,3 kV piirile ning hoiti seda seal samuti 10 min ning registreeriti koormuse ja pinget väärtused. Selle aja möödumisel tõsteti pinget taas ülemisele piirile, oodati koormuse stabiliseerumist, ning langetati taas alumisele piirile. Korra tõsteti pinget veel ülemisele piirile ning seejärel langetati normaaltasemele. Enne katseseadme lahti ühendamist mõõdeti taas koormuse väärtust normaalolukorras.

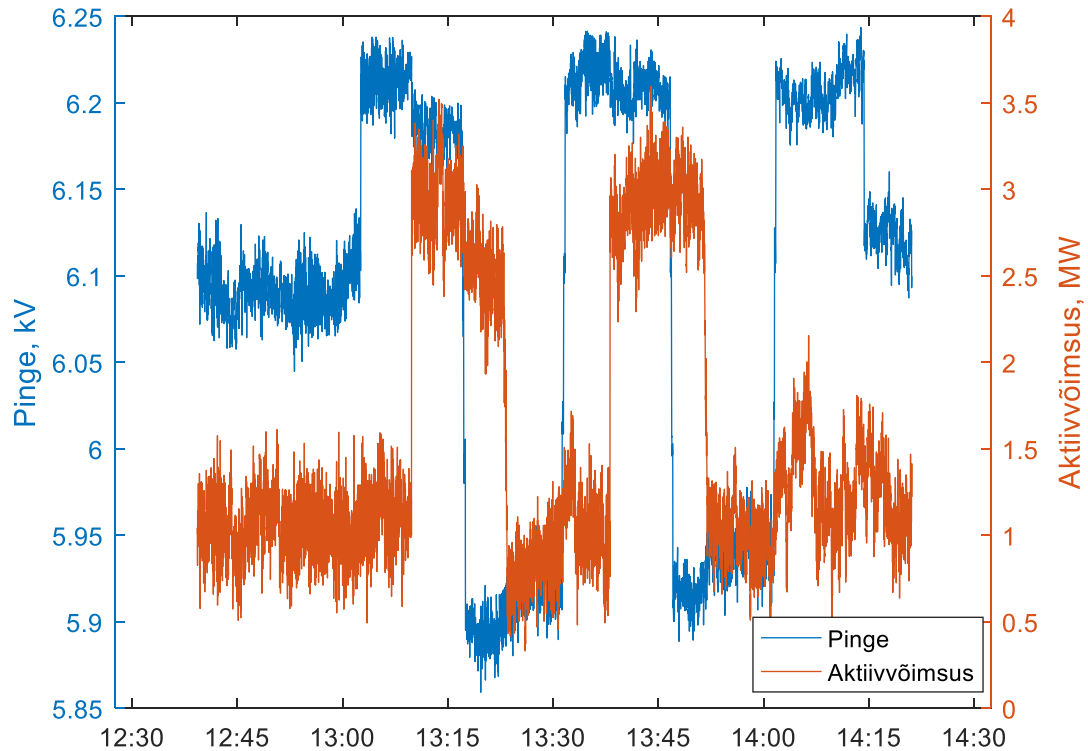
Mõõtmistel kasutati Chauvin Arnaux 8352 tüüpi häireanalüsaatorit. Seade ühendati C1T 10 kV fiidrisse, kust mõõdeti trafo 10 kV koormust ning I sektsiooni pinget.

### **4.2. Mõõtetulemused**

Mõõtmised Sikassaare alajaama I sektsioonis toimusid 5.03.2017 pärastlõunal ajavahemikus 12:30-14:30. Pealelõunane aeg sai valitud, et koormusgraafikust tulenevad tarbimise muutused oleksid võimalikult väikesed ning omaksid võimalikult vähest mõju katse tulemustele.

Mõõtmiseks valitud päev oli tuuline, mis tähendas, et kõik tuuleenergiaal töötavad hajatootjad töötasid peaaegu maksimaalsel võimsusel. Samuti oli võrdlemise suure võimsusega töös koostootmisjaam, mis oli samuti ühendatud Sikassaare alajaama I sektsiooni.

Häireanalüsaator Chauvin Arnoux 8352 mõõtis faasipingeid ja –voolusid viis korda sekundis kogu mõõtmisperioodi vältel. Mõõteseadmest eksporditud mõõteandmed on toodud alljärgneval joonisel 4.1.



**Joonis 4.1. Sikassaare AJ mõõtmistulemused**

Nagu jooniselt näha, ei ole pinge ega aktiivkoormuse väärtus ühtlane, vaid kõigub ajas. Eriti paistab see silma aktiivkoormuse juures, mille väärtus kõigub eriti suure amplituudiga. Nõnda suur väärtuste kõikumine on tingitud tõenäoliselt suures osas sellest, et alajaama trafofiidrisse oli paigaldatud voolutrafo ülekandesuhtega 2500/1, trafofiidri koormus jäi enamasti aga umbkaudu 100 A juurde. See tähendas, et vool voolutrafo sekundaarpoolel jäi milliampritesse ning voolutrafo ise oli tugevalt alakoormatud ja selle mõõtetäpsus ei olnud enam tagatud.

Samuti on näha kahte väga selget hetkelist aktiivkoormuse hüpet. Eeldatavasti on need seotud tuuliku väljalülitumisega kas ülepingsekaitsest liiga suurest tuule kiirusest. Tõenäolisem on esimene variant, kuna peale 10 minuti möödumist lülitus tuulik taas sisse ning mõlemad väljalülitumised toimusid peale pinge tõstmist. Samas jäi pinge alajaamas lubatud piiridesse ning maksimaalsest lubatud suurusest isegi pisut madalamaks, nii et tegelikult väljalülitumist vähemalt alajaamas mõõdetud pingete alusel juhtuda poleks tohtinud.

Selleks, et mõõtetulemusi edasi töödelda tuleb andmetest ebavajalik müra eemaldada ning reaalne info mürast eristada. Selleks kasutatakse mõõteandmete filtreerimist.

### **4.3. Mõõteandmete töötlemine**

Mõõteandmete ühtlasemaks muutmiseks, et oleks võimalik eristada pinge muutumisest tingitud koormuse muutusi juhuslikest koormuse kõikumistest ja mõõtetulemuste esmaseks analüüsiks töödeldi neid esmalt kahte filtrit kasutades, kusjuures muudeti filtrite sammu ja uuriti selle mõju filtreerimistulemustele. Peatüki lõpus leiti koormuse pingetundlikkustegurid nii erineva sammuga filtritega töödeldud andmete põhjal kui ka filtreerimata andmetega ning võrreldi tulemusi.

#### **4.3.1 Liikuv keskmine**

Esmalt filtreeriti saadud mõõtetulemusi liikuva keskmise filtriga. Liikuv keskmine on meetod analüüsimeks sisendandmeid arvutades iga andmerea elemendi jaoks teda mõlemalt poolt ümbritsevate elementide keskmise. Lõigu pikkus, mille keskmist arvutatakse on kasutaja poolt määratud. Mida pikem on lõik, mille keskmist arvutatakse, seda rohkem silub liikuva keskmise funktsioon sisendandmeid, kuid samas seda ebatäpsemaks need ka muutuvad, kuna liikuv keskmine võib sel juhul lisaks mürale ka vajalikku infot välja siluda.

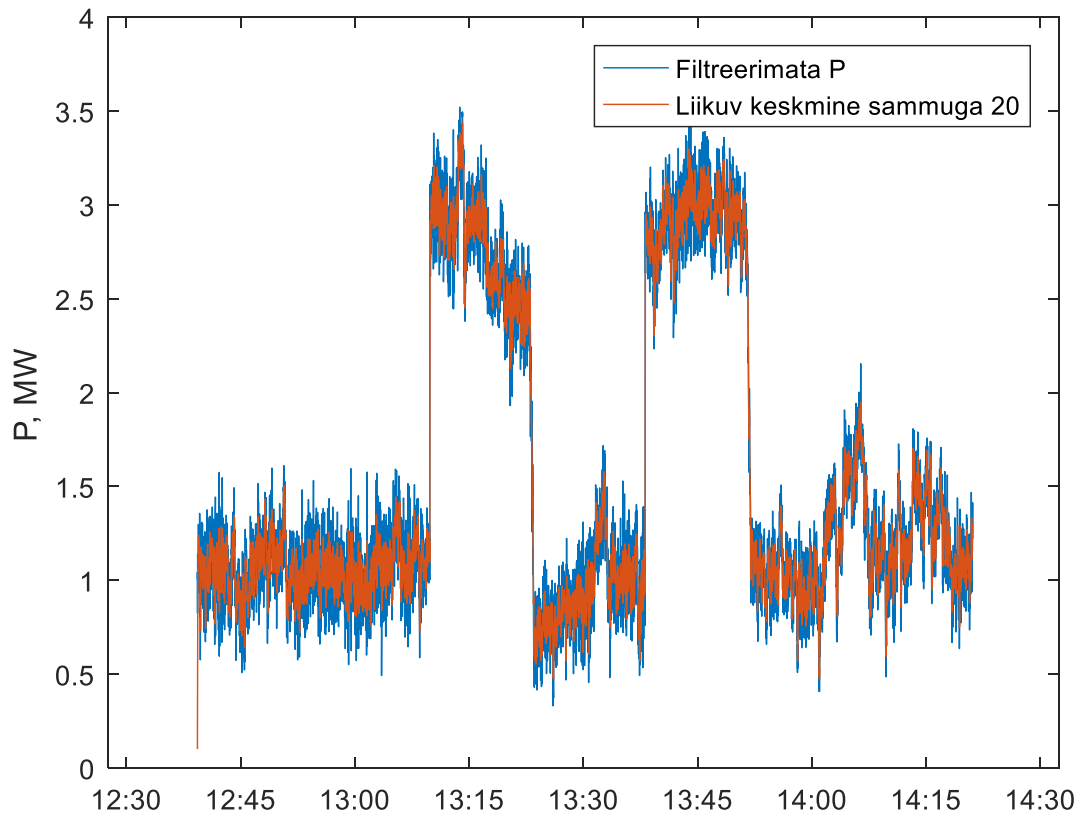
Liikuva keskmise funktsiooni kasutatakse, et välja filtreerida lühiajalisi kõikumisi ja müra ning rõhutada pikaajalisemaid trende. Lävi, missugused kõikumised välja filtreeritakse, sõltub millisel otstarbel liikuvat keskmist kasutatakse ning sellele valitud parameetritest.

Lihtne liikuv keskmine on eelmiste  $n$  elemendi kaalumata keskmine. Inseneriteadustes võetakse keskmine tavaliselt võrdsest arvust andmetest mõlemalt poolt tsentraalset suurust, mille suhtes keskmist arvutatakse. Liikuv keskmine sammuga  $n$  arvutab keskmise igale  $n$  järjestikusele elemendile andmereas. Antud meetodit kasutataksegi esimese filtreerimisfunktsioonina. [32]

Teine levinud liikuva keskmise filter on kaalutud liikuv keskmine. Selles variatsioonis ei oma kõik elemendid lõigus, mille keskmist arvutatakse ühtlast kaalu. Elemendid, mis asuvad keskmise arvutamise lõigus ligemal tsentraalsele väärtusele, mille suhtes keskmist arvutatakse, omavad suuremat osakaalu kui need, mis on lõigu äärmistes punktides.

Lihtsat liikuvat keskmist kasutati Sikassaare alajaama mõõteandmete filtreerimiseks erineva sammuga võrdlemaks tulemusi ning leidmaks sobivaim samm. Liikuvat keskmist leiti antud punktis 10, 20 ja 40 pikkuse mõõteandmete löigu liikuva keskmisena.

Järgneval joonisel 4.2 ongi näha aktiivkoormuse väärtust sammuga 10 filtreeritud ja täielikult filtreerimata kujul.

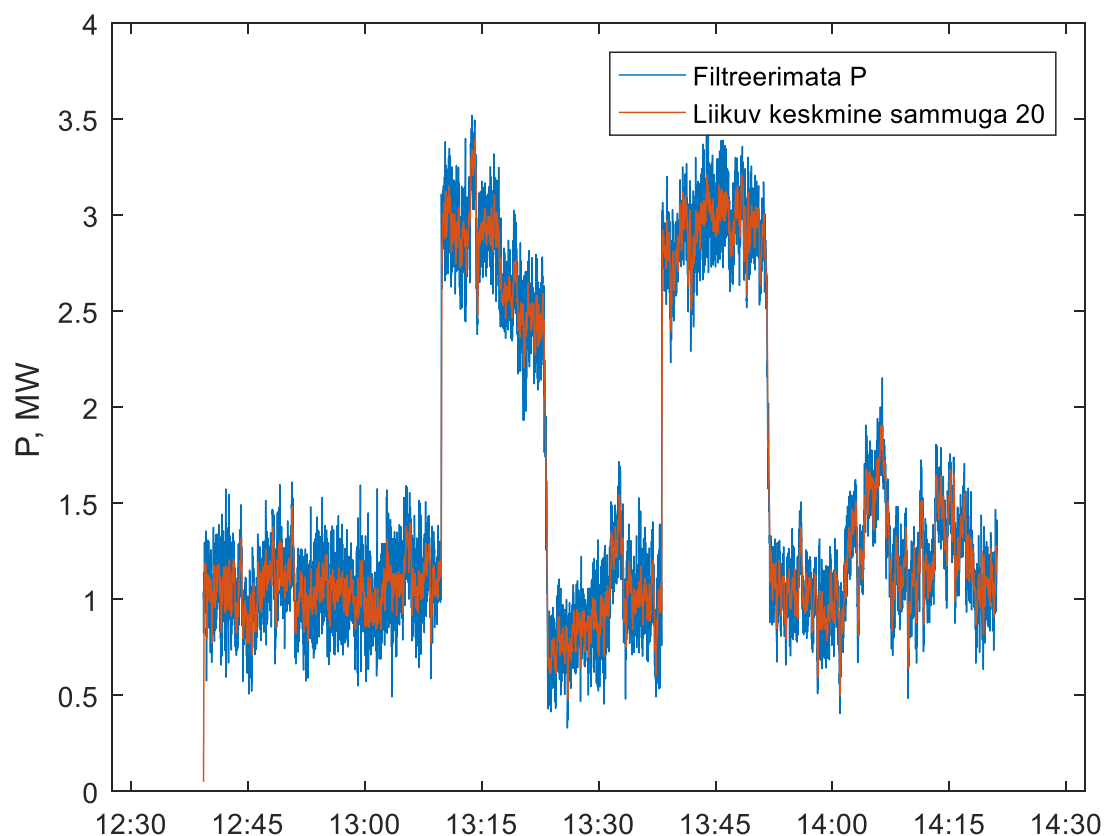


**Joonis 4.2. Liikuva keskmise filter sammuga 10**

Eelpool toodud jooniselt 4.2 on näha, et liikuva keskmise filtri rakendamine mõõteandmetele muutis väljundi oluliselt stabiilsemaks filtreerides välja suuremad piigid, kuid jättes alles üldise trendi. Sellegipoolest on sammuga 10 liikuva keskmisega töödeldud mõõteandmetel veel arvestatav võnkumine, mis raskendab andmete analüüsi.

Edasi suurendati liikuva keskmise sammu 20-ni ning sisendandmed filtreeriti taaskord läbi. Uued tulemused koos esialgsetega on toodud järgneval joonisel 4.3.

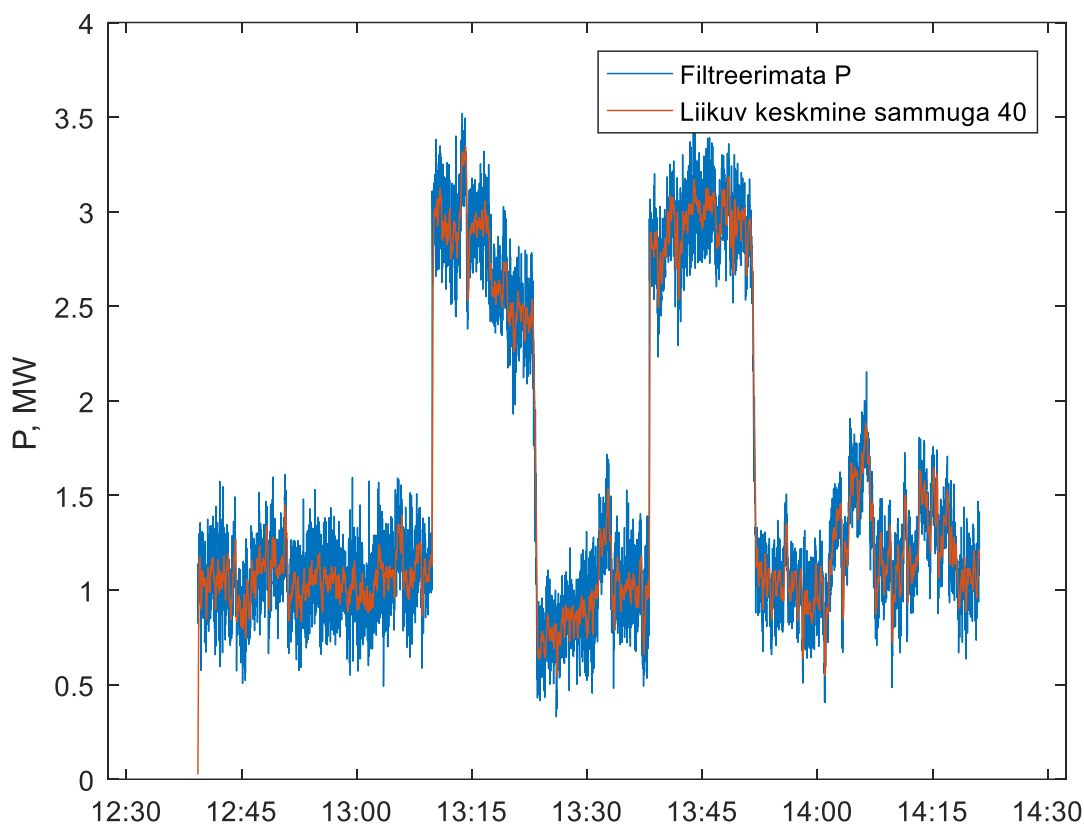
Graafikult 4.3 on näha, et tulemus kõigub veelgi väiksema amplituudiga ja on oluliselt ühtlasem kui sammuga 10 filtreeritud väljund.



**Joonis 4.3. Liikuva keskmise filter sammuga 20**

Viimaks filtreeriti mõõtmisandmeid sammuga 40. Tulemused on toodud alljärgneval joonisel 4.4. On näha, et filter on koormuse kõikumisi veelgi oluliselt vähendanud ning filtreeritud aktiivkoormuse graafik näeb välja võrreldes esialgsega oluliselt stabiilsem ning sellelt on tunduvalt lihtsam tuvastada koormuse muutumise trende.

Erineva sammuga liikuva keskmisega töödeldud mõõteandmetest on näha, et keskmise arvutamise sammu suurendades muutub väljundgraafik oluliselt ühtlasemaks ning koormuse muutumise trendid on paremini tuvastatavad. Liikuva keskmise filtri puhul on näha veel, et antud filtriga töödeldud andmed algavad kõik nullist. Põhjuseks on see, et esimeste andmeridade puhul ei ole võimalik keskmist kogu ette antud sammu pikkuse ulatuses arvutada ja seetõttu on esimesed väärtused nulliga võrdsustatud.

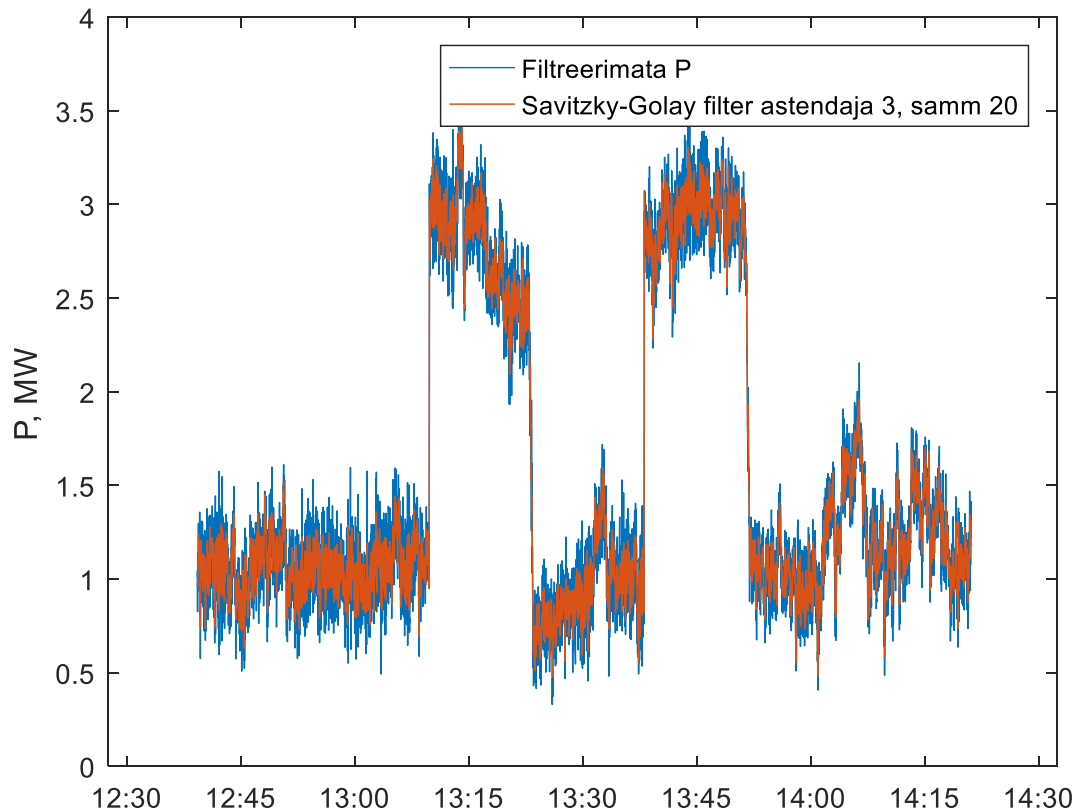


*Joonis 4.4. Liikuva keskmise filter sammuga 40*

### 4.3.2 Savitzky-Golay filter

Liikuva keskmise filtri puhul silutakse ekstreemväärtused enamasti ära. Selleks, et sisendandmeid pisut täpsemalt järgida kasutatakse tihti Savitzky-Golay filtrit, mis moonutab sisendsignaali oluliselt vähem. Savitzky-Golay filter töötleb sisendandmeid konvulsiooniga, sobitades järjestikusele  $n$  elemendile madala astmega polünoomi lineaarsete vähimruutude meetodil. MATLAB-is kasutatakse selleks funktsiooni *sgolayfilt*, kus kasutaja defineerib ära elementide hulga  $n$ , millele polünoomi sobitatakse ja sobitatava polünoomi astme, milleks võib olla 3, 4 või 5. Elementide hulk, millele polünoomi sobitatakse peab kindlasti olema paaritu. [32]

Savitzky-Golay filtriga töödeldud mõõteandmed erineva sammu ning polünoomi astmega on toodud järgnevatel joonistel. Esmalt filtreeriti Sikassaare alajaamas mõõdetud aktiivvõimsust Savitzky-Golay filtriga, mille polünoomi astendaja on 3 ning sobitatavate elementide hulk  $n=21$ . Filtreeritud ning filtreerimata tulemused on toodud graafikul 4.5.

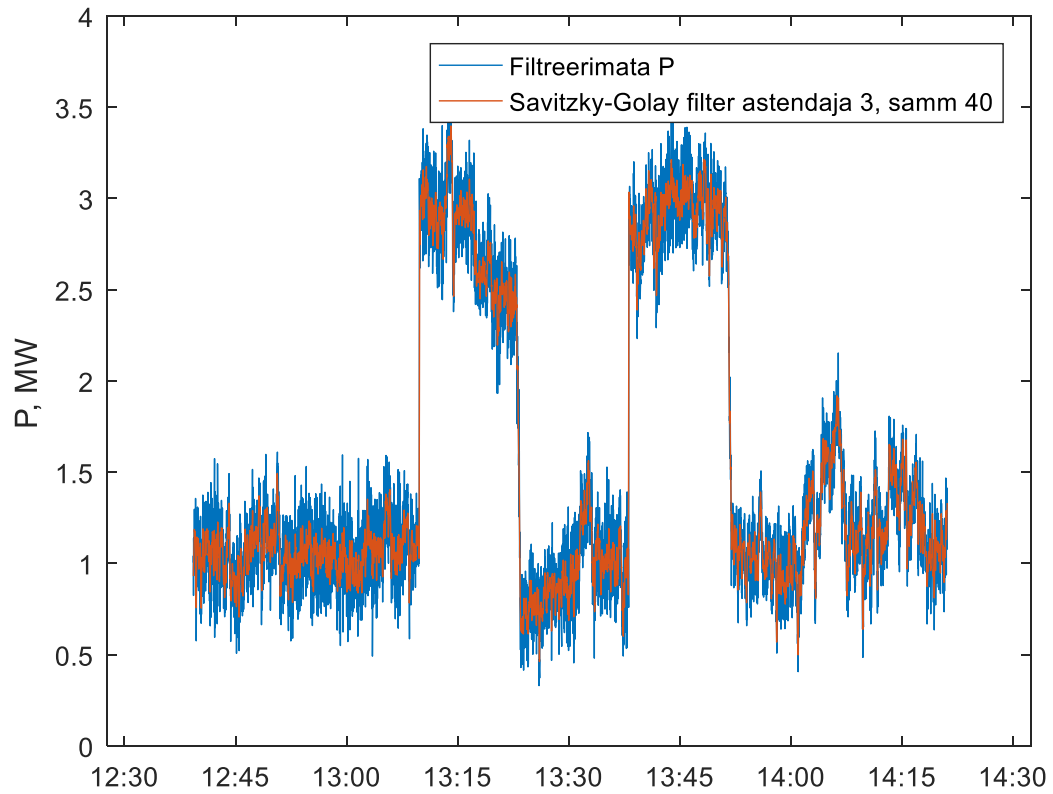


**Joonis 4.5. Savitzky-Golay filtriga (polünoomi astendaja 3, samm 21) töödeldud aktiivvõimsus**

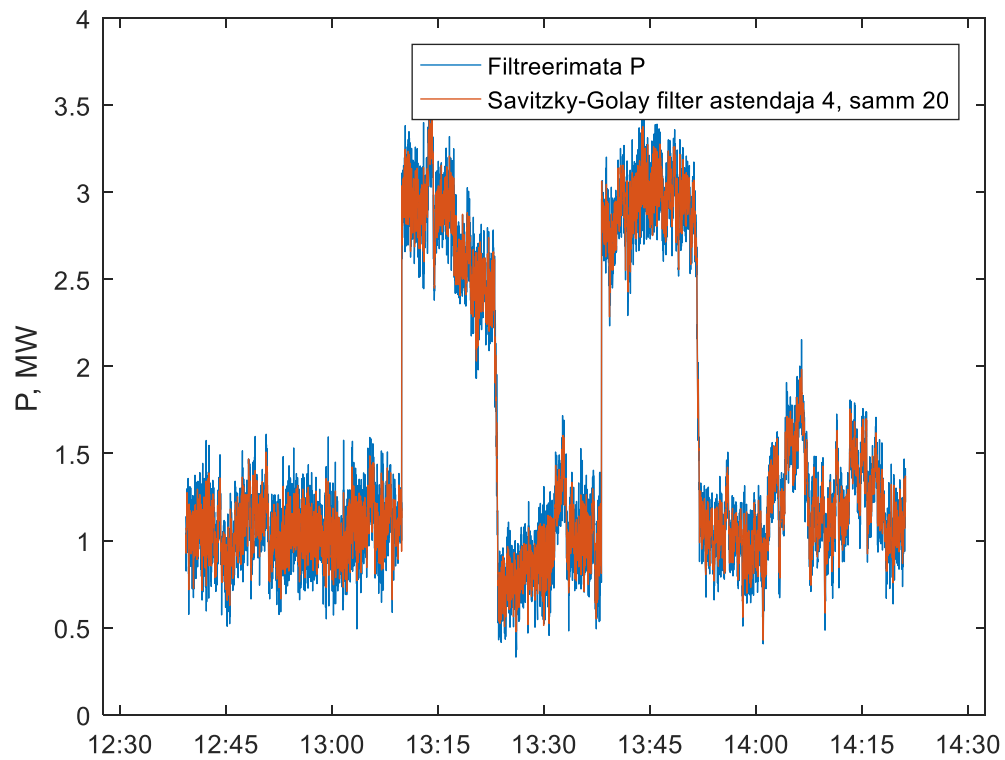
Tulemustest on näha, et Savitzky-Golay filter moonutab sisendsignaali tõepoolest vähem kui liikuv keskmine. Pisut suurema sammupikkusega Savitzky-Golay filter järgib sisendsignaali rohkem siludes välja vaid kõige suuremad koormuse piigid erinevalt varasemalt katsetatud liikuva keskmise filtrist, mis sarnase sammuga silus piigid oluliselt rohkem välja.

Järgmiseks katsetati antud filtrit polünoomi astendajaga 3 ning elementide hulgaga  $n=41$ . Nagu jooniselt 4.6 näha vähendas sammu suurendamine väljundsignaali kõikumist oluliselt. Samas ikkagi oluliselt vähem kui liikuvat keskmist kasutades, kus sama suur väljundsignaali silumine saavutati poole väiksema sammuga.

Edasi katsetati filtri töötamist polünoomi astendajaga 4 ning varasemalt katsetatud elementide hulgaga 21. Tulemused on jällegi toodud järgneval joonisel 4.7. Antud jooniselt lähtub, et suurema astendajaga polünoomi kasutades silub Savitzky-Golay filter väljundsignaali vähem. Näha on et välja filtreeritud on vaid kõige suuremad piigid ning filter järgib sisendsignaali väga täpselt.



**Joonis 4.6. Savitzky-Golay filtriga (polünoomi astendaja 3, samm 41) töödeldud aktiivvõimsus**

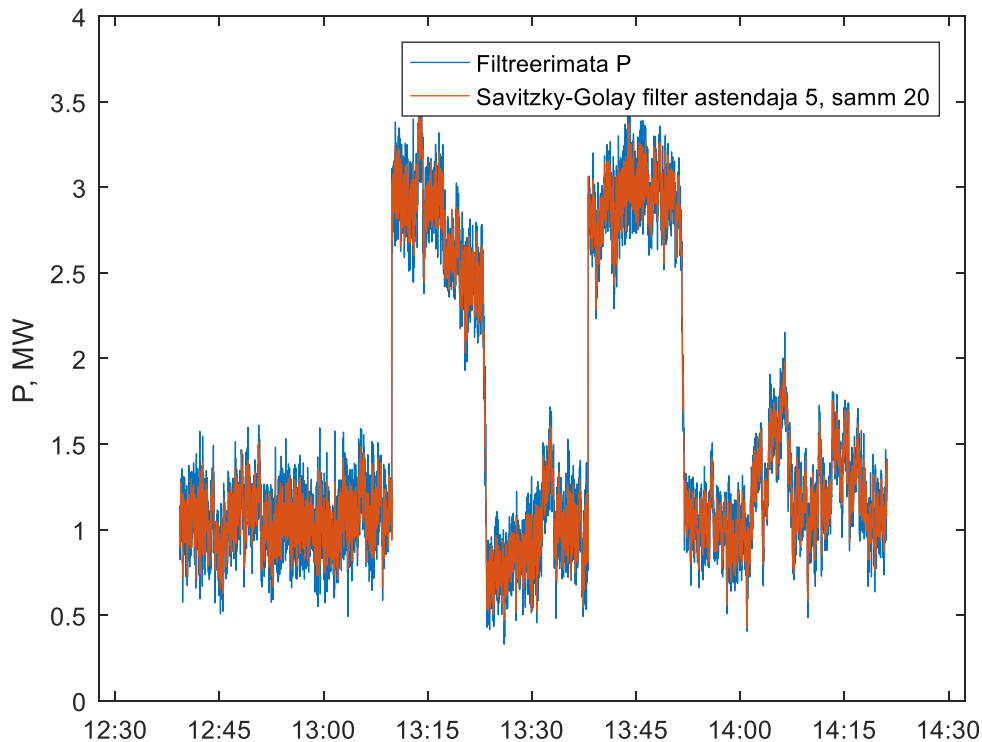


**Joonis 4.7. Savitzky-Golay filtriga (polünoomi astendaja 4, samm 21) töödeldud aktiivvõimsus**



Viimaks katsetati antud filtrit polünoomi astendajaga 5 ning sobitavate elementide hulgaga 21. Tulemused on toodud järgneval graafikul.

Jooniselt 4.8 on näha, et suurendades Savitzky-Golay polünoomi astendajat veelgi, filtreerib antud funktsioon välja veel väiksema osa sisendsignaalist. Filtreerimistulemustest järeldub, et mida suurema polünoomi astendajaga Savitzky-Golay filtrit kasutatakse, seda rohkem antud filter sisendsignaali järgib ja seda vähem see müra välja filtreerib.



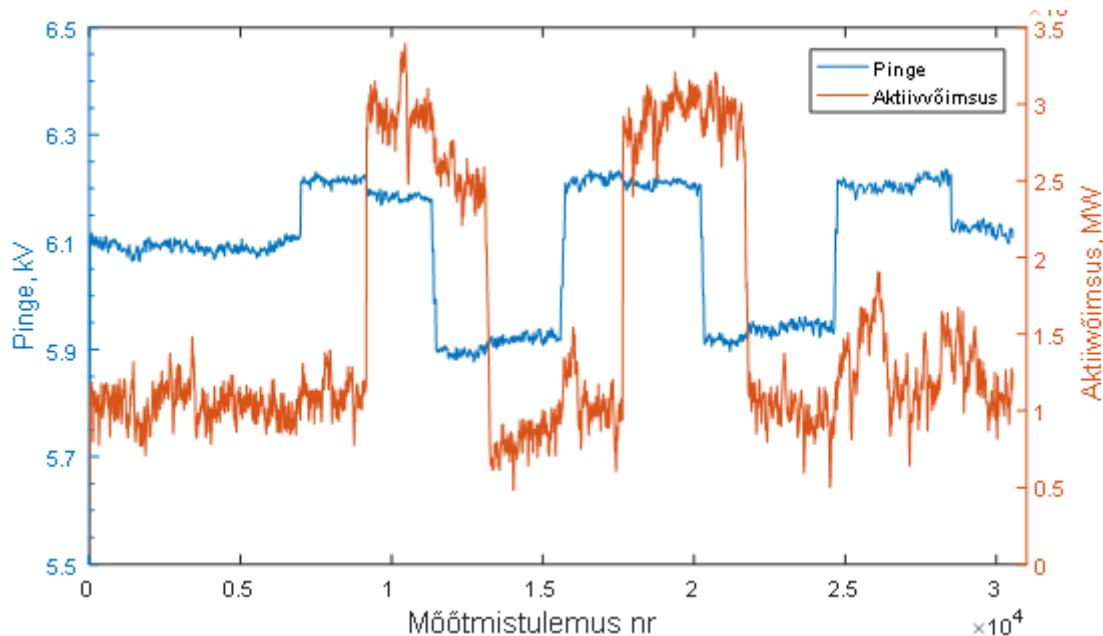
*Joonis 4.8. Savitzky-Golay filtriga (polünoomi astendaja 5, samm 21) töödeldud aktiivvõimsus*

#### **4.4. Mõõtetulemuste analüüs**

Mõõtetulemuste esmaseks analüüsimiseks kasutatakse liikuva keskmisega sammuga 20 töödeldud mõõteandmeid. Antud meetodiga filtreeritud tulemus sai valitud, kuna see on mõõtmistulemuste esmaseks selgitamiseks piisavalt ülevaatlik. Täpsemaks analüüsiks ja koormuse pingetundlikkustegurite määramiseks kasutatakse Savitzky-Golay filtriga töödeldud andmeid.

Järgnevalt liikuva keskmisega filtreeritud trafo pinge ja aktiivkoormuse graafikult hakkab esimesena silma lisaks pinge hüppelistele muutustele ka kaks aktiivkoormuse järsku suurenemist. Tegu on tõenäoliselt ühe hajatootja kahekordse sisse-välja lülitumisega. Esimese väljalülitumise korral on näha selgelt kohe ka pinge väikest vähenemist alajaamas seoses

koormuse järsu suurenemisega. Üldiselt kui katse esimeses poole on pinge muutustest põhjustatavad koormuse muutused selgesti eristatavad, siis katse lõpu poole kõigub koormuse väärtus suure amplituudiga ning viimaste pinge muutuste korral on juba raske pingest sõltuvat koormuse muutust eristada. Täpsemalt analüüsitakse koormuse pingesõltuvust järgmistes punktides.



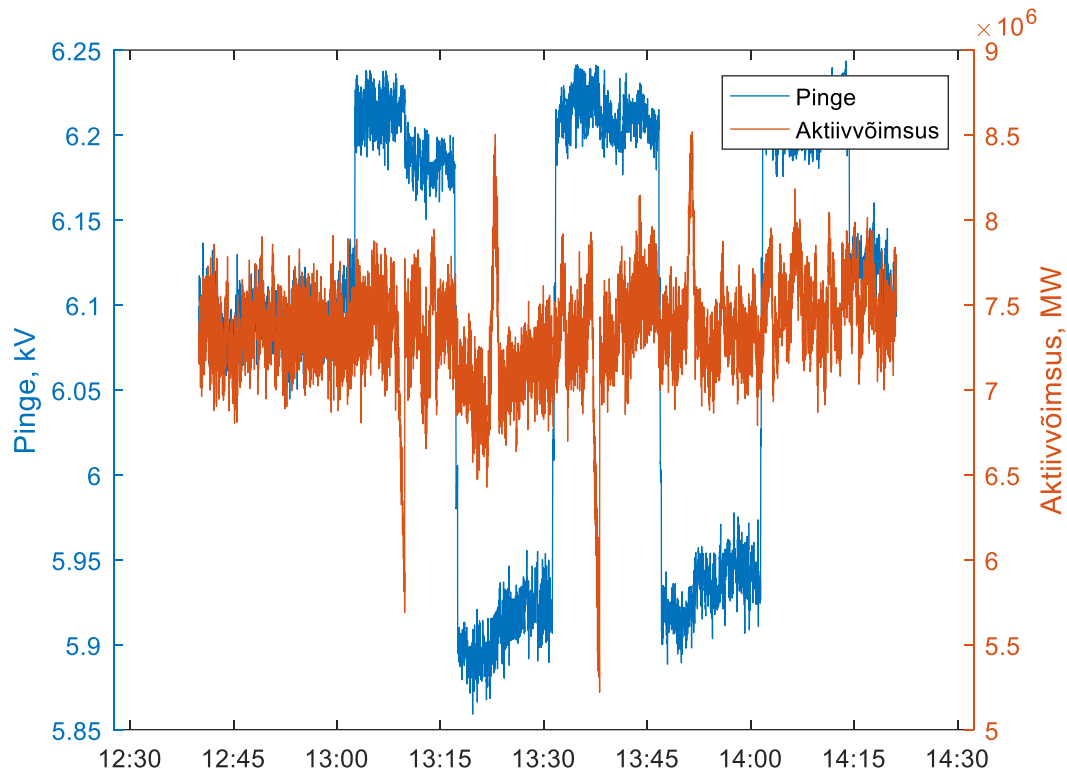
**Joonis 4.9. Mõõdetud pinge ja koormuse graafikud filtreerituna liikuva kesmisega**

#### 4.5. Kogukoormuse leidmine

Alajaamas mõõdeti ainult trafo koormust ning sektsiooni pinget. Selleks, et leida tegelikku koormust tuleb trafo koormusele otsa liita toodetav kogukoormus. Toodetav võimsus saadakse Elektrilevi SCADA andmebaasidest. Mõõteandmed ja SCADA andmed aga on erinevate mõõtetihedustega. Seetõttu tuleb kogukoormuse leidmiseks andmete mõõtesagedus võrdseks saada. Samuti tuleb klappima panna mõõtmiste ajad. Mõõtmiste aegade klappima saamiseks võetakse SCADA mõõteandmetest vastav lõik samade algus ja lõpuaegadega. Kuna mõõteseadmed pole aga täpselt sünkroniseeritud, siis tekib paratamatult sisse väike viga.

Mõõteandmete tihedus saadakse võrdseks kasutatades MATLAB-i *resample* funktsiooni, mis muudab sisendandmete tiheduse kasutaja poolt määratud parameetrite  $p$  ja  $q$  jagatise  $p/q$  kordseks. Antud funktsiooni kasutataksegi SCADA mõõteandmete tiheduse suurendamiseks. Kui mõlemad andmed on sama tihedusega ning samas ajaperioodis siis mõlemad andmehulgad- häireanalüsaatorist pärit trafo koormus ja SCADA-st pärit hajatootmisseadmete

tootmisandmed summeeritakse. Saadud kogukoormuse graafik on toodud järgneval joonisel 4.10.



**Joonis 4.10. Tegelik tarbimine**

Graafikul on näha piigid, mis on tekkinud erinevatest allikatest pärit andmete ajalisest väikesest ebatäpsusest- kuna SCADA-st pärit mõõteandmed on väiksema mõõtetihedusega, siis selle mõõtetulemustes reageeritakse tuuliku sisse- ja väljalülitumisele pisut hiljem. Kui häireanalüsaator on sisse- või väljalülitumise juba registreerinud, kuid SCADA andmetesse pole see veel jõudnud, siis tekib summaarsesse võimsusesse mõneks hetkeks piik, mis on põhjustatud vastavalt sisse või välja lülituva tuuliku võimsuse kahekordsest arvestamisest.

#### **4.6. Koormuse pingetundlikkustegurite leidmine**

Koormuse pingetundlikkused leitakse kahel meetodil- esiteks vähemruutude meetodil nagu 3. peatükis ja teiseks logaritmime teel.

Koormuse pingetundlikkustegur leitakse ainult aktiivkoormusele, sest reaktiivkoormust trafo 10 kV õlas hoitakse automaatse kondensaatorpatareide juhtimisega nulli lähedal. Seetõttu ei ole tagatud põhiline eeldus, et koormus katse vältel ei muutu. Samuti, kuna kondensaatorpatareide sisse-väljalülitamisi saadaval polnud, siis ei olnud võimalik usaldusväärset analüüsi läbi viia. Ainult trafo väikese absoluutväärtusega reaktiivkoormuse

alusel pole võimalik saada kasutuskõlblikke tulemusi. Liiatigi, et nagu 3. peatükis tõestatud läheneb trafo reaktiivkoormuse nullile lähenemisel reaktiivvõimsuse pingetundlikkustegur lõpmatusele.

#### 4.6.1 Vähemruutude meetod

Vähemruutude meetodit kasutati ulatuslikult 3. peatükis tehtud mudeli simulatsioonide juures. Tehtud simulatsioonitulemused kinnitasid, et meetod annab koormuse pingetundlikkustegurite arvutamisel täpseid tulemusi. Antud meetodit on täpsemalt selgitatud punktis 3.2.1

Vähemruutude meetodit rakendatakse nii kogu mõõtmisele terviklikult kui ka erinevatele katse lõikudele ositi. Võrreldakse saadud tulemusi ning antakse hinnang tulemuste täpsusele ning usaldusvärsusele.

Koormuse pingetundlikkustegurite määramiseks kasutatakse eelmises punktis leitud kogukoormuse väärtusi ning alajaamas mõõdetud pinge väärtusi. Baaspinged ja võimsused leitakse normaalolukorra mõõteandmete vahemiku keskmisena.. Esmaseks koormuse pingetundlikkuse pakkumiseks valitakse 1,2, millest skript hakkab vähemruutude meetodil tegelikku koormuse pingetundlikkustegurit leidma.

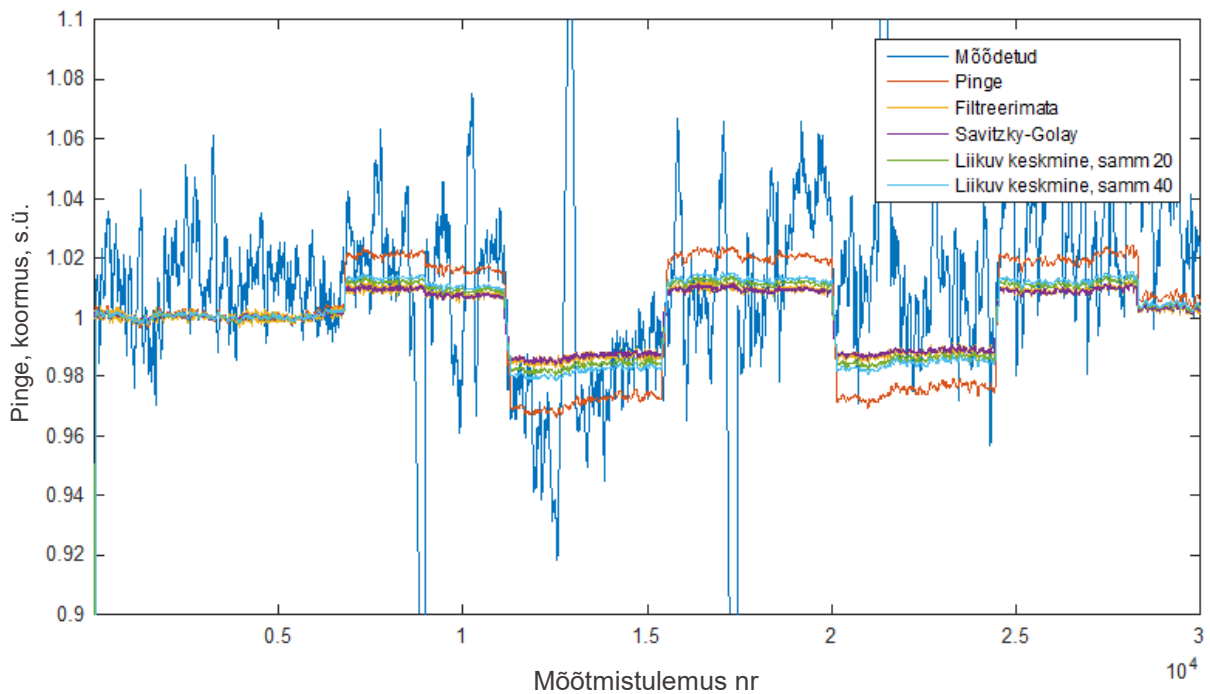
Kõigepealt leitakse ülevaatlikkuse nimel kogu mõõtmiste ulatuses resulteeruv aktiivkoormuse pingetundlikkustegur. Seda tehakse erinevalt töödeldud sisendandmetega- nii filtreerimata kui ka erinevaid filtreid kasutades. Tulemused on toodud järgnevas tabelis 4.1

**Tabel 4.1. Aktiivkoormuse pingetundlikkustegurid leitud kõigi mõõtmistulemute alusel**

Sisendandmed	Mõõteandmete vahemik	Kpu
Filtreerimata	1...30300	0,4745
Savitzky-Golay filter, polünoomi astendaja 3, samm 20	1...30300	0,4622
Liikuv keskmine, samm 20	1...30300	0,5754
Liikuv keskmine, samm 40	1...30300	0,6360

Nagu ülaltoodud tabelist näha, on filtreerimata ja Savitzky-Golay filtriga töödeldud aktiivkoormuse pingetundlikkustegurid väga lähedaste väärtustega jäädes vahemikku 0,46...0,47; liikuva keskmise filtriga töödeldud sisendandmete puhul aga on aktiivkoormuse pingetundlikkustegur arvestatavalt suurenenud olles vastavalt sammu pikkusele 0,57..0,63

juures. Vähemruutude meetodil leitud tulemus sõltub väga palju baassuurusteks valitud pingest ja koormusest, seetõttu on kõigil juhtudel mõõteandmetes olukord, mil võrk töötab normaalolukorras. Joonisel 4.11 on toodud vähemruutude meetodil leitud aktiivkoormuse pingetundlikkustegurite kaudu arvatud koormused ning tegelikud mõõdetud koormused.



**Joonis 4.11. Vähemruutude meetodil leitud aktiivkoormuse pingetundlikkustegurite kaudu arvatud koormused ning tegelikud mõõdetud koormused**

Eelnevalt jooniselt on näha, et reaalsed mõõtmistulemused on oluliselt ebahühtlasemad kui pingetundlikkusteguri kaudu arvutuslikult leitud tulemused. Kui katse alguses pinge tõstmisel ja langetamisel langevad arvutuslik ja mõõdetud koormus veel üldjoontes kokku, siis katse lõpu poole, eriti kahe viimase pingemuutuse juures, on mõõdetud koormuse keskväärts stabiilselt suurem arvutuslikust. Selle põhjuseks võib olla koormuse mõningane juhuslik suurenemine katse käigus. Seda oletust kinnitab ka fakt, et katse lõpus normaalolukorras on mõõdetud koormus pisut suurem kui katse alguses normaalolukorras. Algul oli normaalolukorra keskmine koormus 7,33 MW ja lõpus 7,51 MW.

Järgnevalt muudetakse mõõteandmete vahemikku, mille alusel pingetundlikkustegurit määratakse. Uueks vahemikuks valitakse 6000...16000. Selles vahemikus on baaspinge ja -koormuse määramiseks lühike normaalalitus, mil pinget muudetud veel ei olnud. Lisaks jääb antud mõõteandmete vahemikku esimene pinge tõstmine normaalalitusest ülapiirile ja esimene pinge langetamine alapiirile koos stabiliseerumisega ning pinge taaskordne tõstmine ülapiirile. Leitud aktiivkoormuse pingetundlikkustegurid on toodud järgnevas tabelis 4.2.

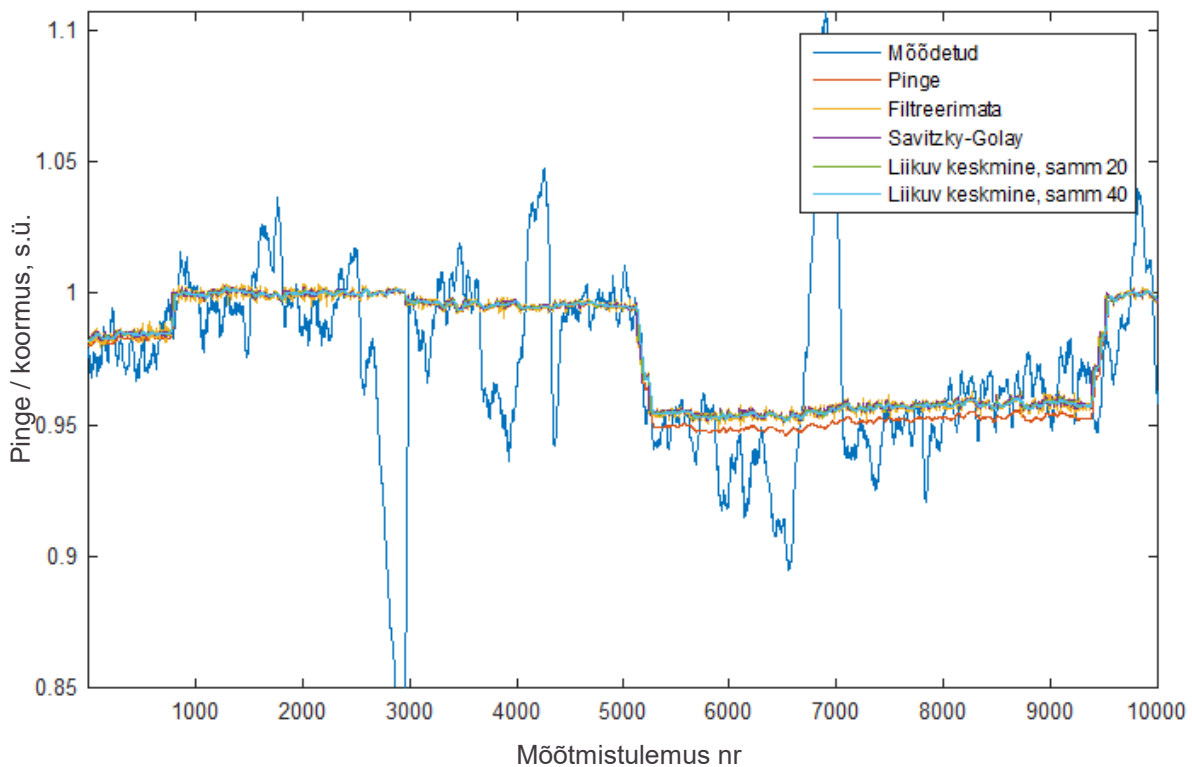
**Tabel 4.2. Aktiivkoormuse pingetundlikkustegurid mõõteandmete lõigul 6000...16000**

Sisendandmed	Mõõteandmete vahemik	Kpu
Filtreerimata	6000...16000	0,6341
Savitzky-Golay filter, polünoomi astendaja 3, samm 20	6000...16000	0,6278
Liikuv keskmine, samm 20	6000...16000	0,6257
Liikuv keskmine, samm 40	6000...16000	0,6248

Mõõteandmete vahemikus 6000...16000 langevad erinevalt filtreeritud sisendandmetega arvatud tulemused suurepäraselt kokku, Kpu jääb kõigi filtritega 0,63..0,64 vahele. Näha on, et võrreldes eelmise katsega on antud vahemikus koormuse pingetundlikkustegur pisut suurem. Muutus on toimunud just filtreerimata andmete ja Savitzky-Golay filtriga filtreeritud andmete alusel arvatud pingetundlikkustegurite korral. Liikuva keskmisega filtreeritud pingetundlikkustegurid on vähem muutunud.

Joonisel 4.12 on toodud mõõteandmete vahemikus 6000...16000 leitud pingetundlikkustegurite alusel arvatud ning alajaamas mõõdetud koormuste väärtused. Samuti on antud graafikul toodud mõõdetud pinge väärtused, mis on filtreeritud liikuva keskmise filtriga.

Olgugi, et mõõdetud koormus kõigub märgatavalt, on ülaltoodud jooniselt on näha, et arvutuslikud aktiivkoormuse pingetundlikkustegurid langevad üldjoontes kokku mõõdetutega. Pinge tõstmisel ja langetamisel on selgelt näha nii mõõdetud kui ka arvutuslike koormuste muutust teoreetiliselt eeldatavas suunas. Eriti hästi on see näha pinge langetamisel, mil mõõdetud koormus väheneb esialgu küll rohkem, kuid stabiliseerub seejärel samale tasemele arvutusliku koormusega. Antud käitumine langeb kokku materjalis [24] saadud tulemustega, kus samuti toimus pingemuutuse järgselt esialgu suurem koormuse muutus, mis mõne aja möödudes stabiliseerus madalamale tasemele.



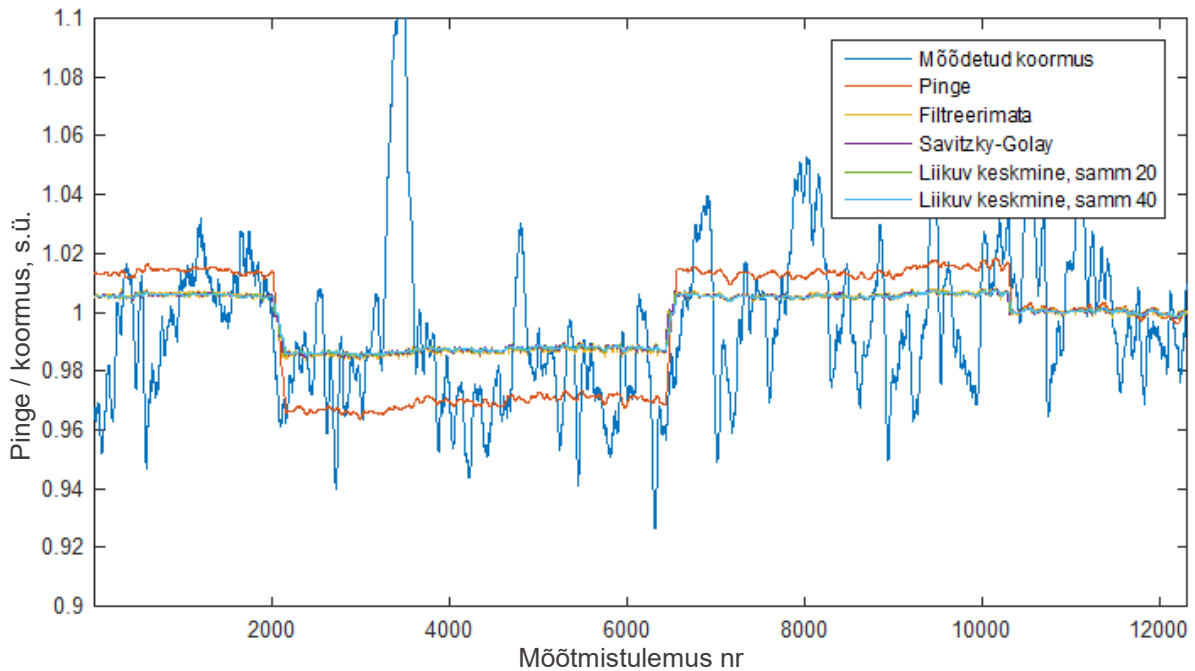
**Joonis 4.12. Arvutatud koormused ning tegelikud mõõdetud koormused mõõtmistulemuste vahemikus 6000-16000**

Järgnevalt vaadeldakse aktiivkoormuse pingetundlikkustegurit mõõteandmete vahemikus 18000...30300. Antud vahemikus on kajastatud kõik eelmises piirkonnas välja jäänud pingemuutused. Vaatluse all olevasse vahemikku jäävad üks pinge langetamine ülapiirilt alapiirile, üks pinge tõstmine alapiirilt ülapiirile ning pinge langetamine ülapiirilt normaaltasemele. Normaallolukorra parameetrite alusel leitakse baaspinge ja –võimsus, mida kasutades normeeritakse kõik mõõteandmed. Vähemruutude meetodil leitud aktiivkoormuse pingetundlikkustegurid on toodud järgnevas tabelis 4.3.

**Tabel 4.3. Aktiivkoormuse pingetundlikkustegurid mõõteandmete lõigul 18000...30300**

Sisendandmed	Mõõteandmete vahemik	Kpu
Filtreerimata	18000...30300	0,4230
Savitzky-Golay filter, polünoomi astendaja 3, samm 20	18000...30300	0,4155
Liikuv keskmine, samm 20	18000...30300	0,4129
Liikuv keskmine, samm 40	18000...30300	0,4111

Nagu ülaltoodud tabelist 4.3 näha, on erinevate filtritega töödeldud sisendandmeid kasutades aktiivkoormuse pingetundlikkustegurid väga sarnaste väärtustega. Arvutuslikud pingetundlikkustegurid mõõteandmete vahemikus 18000...30300 jäävad 0,41...0,42 vahele. Saadud tulemus on väiksem kui eelmistes punktides leitud aktiivkoormuse pingetundlikkusteguri väärtused.



**Joonis 4.13. Arvutatud koormused ning tegelikud mõõdetud koormused mõõtmistulemuste vahemikus 6000-16000**

Ka jooniselt 4.13 on näha, et antud mõõtetulemuste vahemikus kõigub koormus suuremates piirides kui eelmistel juhtudel ning väga raske on hinnata mõõdetud koormuse vastavust pingetundlikkusteguri järgi arvutatud koormustele. Kuna koormuse väärtus kõigub nii suurtes piirides on raske selgelt tuvastada koormuse muutust, mis on tingitud pingemuutusest. Pinge muutumisel on koormusel siiski korrelatsioon pingemuutusega samas suunas, mis on seotud koormuse pingesõltuvusega. Kuna antud trend on nii vähemärgatav võrreldes eelmiste arvutuste ja koormuse juhusliku kõikumisega, siis käesolevas katses leitud koormuse pingesõltuvusteguri väärtus on ka väike.

Peale mõõteandmete filtreerimist, analüüsimist ning vähemruutude meetodiga koormuse pingetundlikkustegurite leidmist võib järeldada, et mõõtmiste esimeses pooles oli koormuse reaktsioon pingemuutusele tugevam ning paremini tuvastatav, mistõttu tuli mõõtmiste esimese poole alusel leitud pingetundlikkustegurite väärtused suuremad.



Mõõtmiste teises pooles aga kõikusid koormuste väärtused suurtes piirides ning koormuse ja pinge vaheline sõltuvus oli nõrgem või lihtsalt ei paistnud suurte koormuse juhuslike muutuste tõttu välja. Ebatäpsusi võisid põhjustada varasemalt kirjeldatud mõõteandmete määramatused- SCADA-st pärinevad andmed olid oluliselt suurema intervalliga kui häireanalüsaatorist pärit andmed. Seetõttu ei pruugitud täpselt registreerida koormusmuutusi, mis olid seotud hajatootjate tootmisega.

## 4.6.2 Logaritmimine

Valideerimaks eelmises punktis saadud aktiivkoormuse pingetundlikkusteguri väärtusi, leitakse need ka teisel meetodil- logaritmidel. Antud on matemaatiliselt tuletatud koormuse eksponentmudeli üldavaldisest. Koormuse eksponentmudeli alusel avaldub aktiivvõimsuse pingetundlikkustegur  $k_{pu}$ :

$$P = P_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{k_{pu}} \Rightarrow \frac{P}{P_n} = \left( \frac{U}{U_n} \right)^{k_{pu}} \Rightarrow k_{pu} = \log_{\frac{U}{U_n}} \frac{P}{P_n} \Rightarrow k_{pu} = \frac{\log \frac{P}{P_n}}{\log \frac{U}{U_n}} \quad (4.1)$$

Antud valemi 4.1 alusel leitakse kogu mõõtmiste ulatuses joonisel 4.14 toodud MATLAB-i skripti abil pingetundlikkustegurid. Mida ühtlasemad on saadud tulemused, seda usaldusväärsem on logaritmimise tulemus.

Joonisel 4.14 on toodud logaritmimise meetodi skript. Esmalt määratakse muutujatega *algus* ja *lopp* kindlaks mõõteandmete piirkond, mille koormuse pingetundlikkustegurit logaritmimise teel leitakse. Seejärel leitakse baaspinge, mille alusel normeeritakse ära mõõdetud pinged eelnevalt defineeritud vahemikus. Järgmiseks leitakse baasaktiivvõimsus, mille alusel leitakse mõõdetud suuruseid baassuurusega läbi jagades normeeritud aktiivvõimsus. Seejärel normeeritud aktiivvõimsuse ja pinge logaritmimisel saadakse koormuse pingetundlikkustegurite väärtused. Saadud pingetundlikkusteguritest leitakse keskmine. Iga väärtuse juures arvutatakse leitud keskmise koormuse pingetundlikkusteguriga arvutuslik koormus. Viimaks luuakse graafik, millel on suhtühikutes toodud pinge, tegelik koormus ja arvutuslik koormus.

```

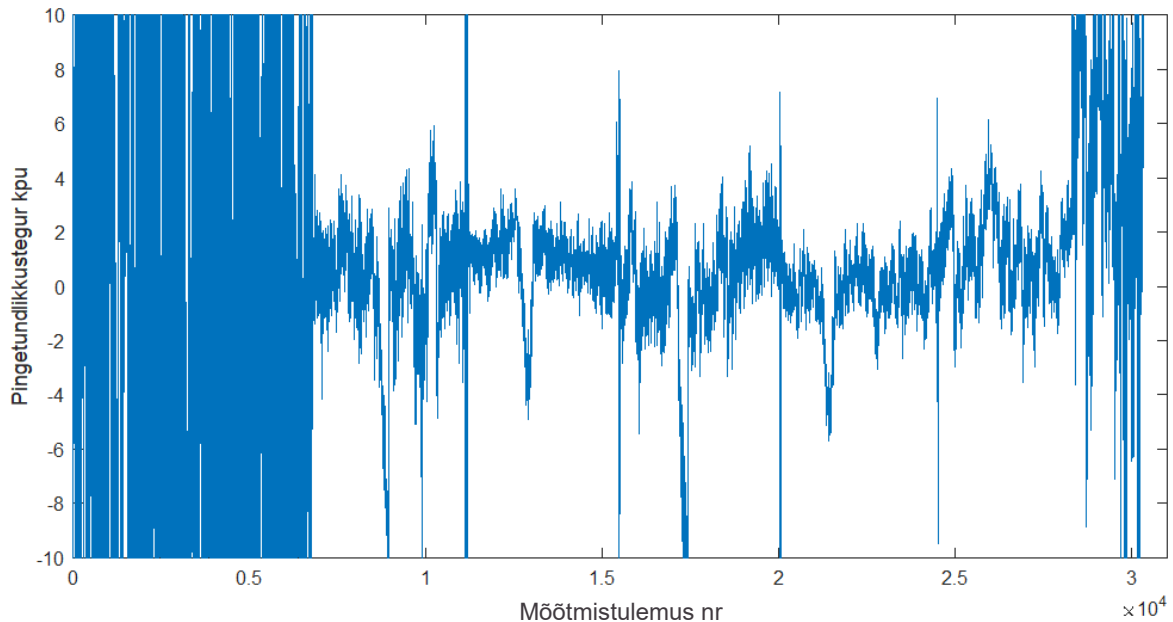
algus=7000;
lopp=28000;
U0=mean(U40(1:2500));
Unorm=U40(algus:lopp)/U0;
P0=mean(Pavg40(1:2500));
Pnorm=Pavg40(algus:lopp)/P0;
Logaritm=log(Pnorm)./log(Unorm);
Kpu=mean(Logaritm);
Parv = Unorm.^(Kpu);

figure
plot(Parv)
hold on
plot(Pnorm)
hold on
plot(Unorm)
axis tight
hold off
legend('Arvutatud kogukoormus', 'Mõõdetud kogukoormus', 'Mõõdetud pinge')

```

**Joonis 4.14. Logaritmimise meetodil soormuse pingetundlikkustegurite leidmise skript**

Järgneval joonisel 4.15 on iga koormuse ja pinge väärtuse juures leitud logaritmimise teel leitud arvutuslikud aktiivkoormuse pingetundlikkustegurid.

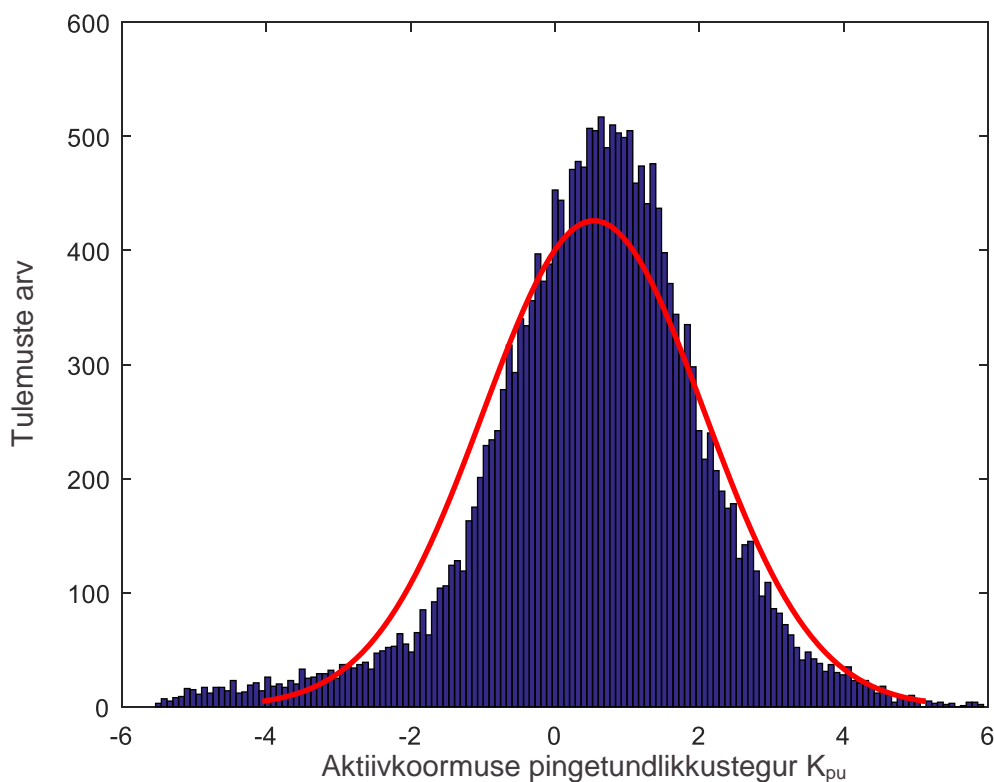


**Joonis 4.15. Logaritmimise teel leitud pingetundlikkusteguri väärtused**

Nagu ülaltoodud jooniselt näha, kõigub logaritmimise teel saadud pingetundlikkustegur pidevalt. Eriti suur on kõikumine mõõtmiste alguses ja lõpus. Aktiivkoormuse pingetundlikkustegur on eriti suure absoluutväärtusega ning kõigub positiivse ja negatiivse

vahel väga tugevalt mõõtmiste alguses ja lõpus, sest antud piirkondades mõõdeti pinget ja koormust normaalolukorras, mil pinge ja koormus olid baaspinge ja -võimsuse lähedal ehk nende normeeritud väärtused olid ühe lähedal. Kui koormuse eksponentfunktsiooni alus on üks, siis ei ole võimalik leida funktsiooni astendajat, kuna 1 ükskõik millises astmes on ikka 1. Kuna normaalolukorras olid normeeritud pinge ja koormus ühele väga lähedal, siis sellises olukorras tuli funktsiooni astendaja väga suure väärtusega.

Joonisel 4.16 on toodud logaritmimeel saadud aktiivkoormuse pingetundlikkustegurite histogramm. Histogrammilt on välja jäetud üksikud ekstreemselt suured ning ebarealistlikud pingetundlikkusteguri väärtused, mis on saadud 1 lähedast arvu baaskoormuse juures logaritmides. Koormuse pingetundlikkuste histogrammile on lisatud veel normaaljaotuse kõver.



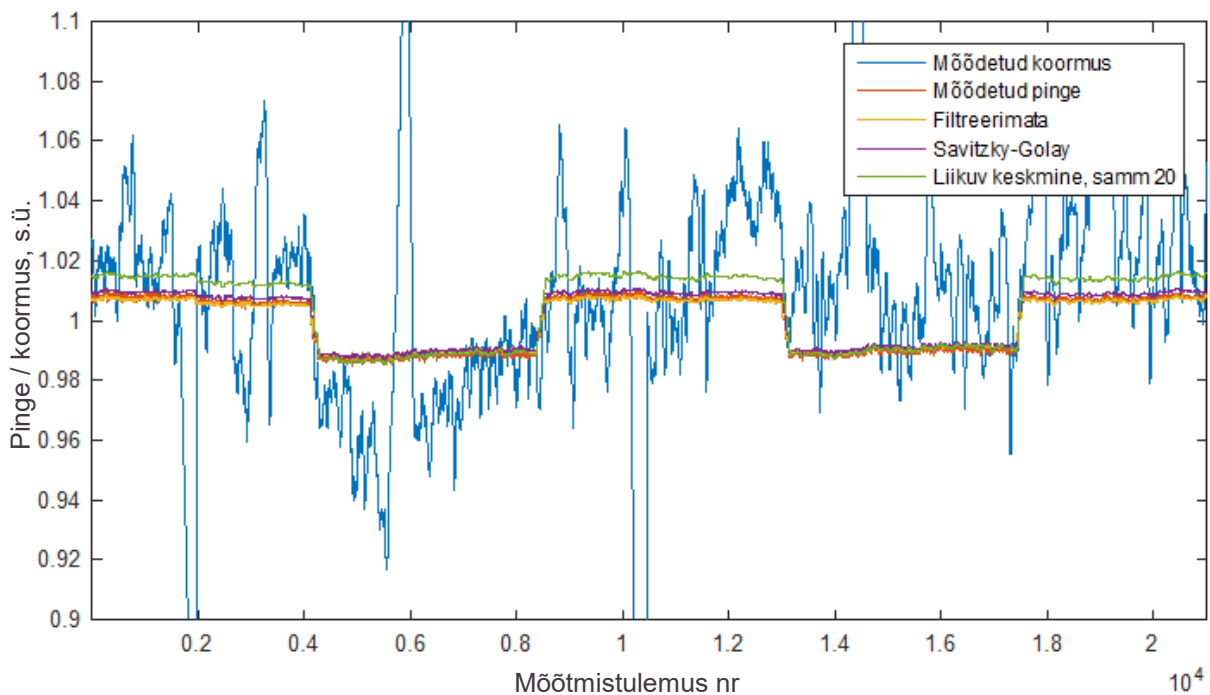
**Joonis 4.16. Koormuse pingetundlikkusteguri väärtused logaritmimise teel histogrammina**

Kuna olukorras, kus normeeritud koormus on 1 lähedal ja seetõttu logaritmimise teel aktiivkoormuse pingetundlikkustegurit ei ole võimalik usaldusväärselt leida, siis neid piirkondi mõõtmise alguses ja lõpus pingetundlikkusteguri leidmisel arvesse ei võetud. Mõõteandmete vahemikuks, mille alusel koormuse pingetundlikkustegurit leida valiti 7000...28000. Järgnevalt on toodud logaritmimise teel leitud pingetundlikkustegurid erinevate filtritega töödeldud sisendandmetega.

**Tabel 4.4. Logaritmimise teel leitud pingetundlikkustegurid**

Sisendandmed	Mõõteandmete vahemik	Pingetundlikkustegur
Filtreerimata	7000...28000	0,3932
Savitzky-Golay, polünoomi astendaja 3, samm 20	7000...28000	0,3569
Liikuv keskmine, samm 20	7000...28000	0,4018
Liikuv keskmine, samm 40	7000...28000	0,5340

Tabelist 4.4 on näha, et logaritmimise teel leitud pingetundlikkustegurid on võrdlemisi väikesed ning jäävad ligikaudu 0,40 juurde. Filtreerimata, Savitzky-Golay filtriga töödeldud ja liikuva keskmisega sammuga 20 töödeldud sisendandmete alusel leitud koormuse pingetundlikkustegurid on kõigil sarnased jäädes varem mainitud 0,4 juurde. Ainult sammuga 40 liikuva keskmisega filtreeritud sisendandmete alusel saadi aktiivkoormuse pingetundlikkusteguri väärtus suurem- 0,53. Järgneval joonisel 4.17 on toodud mõõdetud ja logaritmimise teel leitud pingetundlikkustegurite alusel arvatud koormused.



**Joonis 4.17. Logaritmimise teel leitud pingetundlikkustegurite järgi arvatud koormus ja kogukoormus**

Jooniselt 4.17 on näha, et arvutuslik koormus muutub väikese koormuse pingetundlikkusteguri tõttu võrdlemisi vähe. Eriti simulatsiooni alguses paistab silma, et

mõõdetud koormus muutub suuremates piirides kui arvutuslik. Katse lõpu poole, kui koormus pinge muutumisel enam nii silmnähtavalt ei muutu, peab arvutuslikult leitud graafik paremini paika. Samas selleks hetkeks on koormus pisut tõusnud ning arvutuslik graafik jääb madalamale mõõdetust. Oleks baasandmed valitud katse lõpu alusel, kattunuks graafikud katse lõpus paremini. See aga oleks suurendanud viga katse alguses.

#### **4.7. Analüüs**

Neljanda peatüki peamiseks eesmärgiks oli Sikassaare alajaama esimeses sektsioonis tehtud mõõtmistulemuste abil selle koormuse pingetundlikkustegurite leidmine eelmises punktis uuritud meetodil. Kui kolmandas peatükis oli võimalik mudelist pärit andmete alusel väga täpselt koormuse pingetundlikkusparameetreid määrata ilma, et need sõltuksid missugust osa mõõteandmetest kasutada, siis reaalsete mõõtetulemuste korral on asi tunduvalt keerulisem. Esiteks ei ole mõõtmistel saadud pinged ja eriti koormused sugugi nii stabiilsed kui mudelis ning selleks, et neile esmast hinnangut anda tuleb neid eelnevalt filtritega töödelda.

Teiseks ei ole kõik andmed nii lihtsalt kättesaadavad kui mudelist ja andmed, mis lõpuks saadakse ei pruugi olla sama täpsuse ja tihedusega, mis suurendab tulemuse viga veelgi. Samuti lülitus antud katse jooksul sisse-välja üks tuulik, mis mõjutas pingeid ja koormusi alajaamas mis võis omakorda suurendada viga lõpptulemuses, kuna tootmisandmed olid mõõdetud trafokoormusest väiksema täpsusega.

Peale mõõteandmete filtreerimist ja vähemruutude abil aktiivkoormuse pingetundlikkusteguri leidmist erinevalt filtreeritud andmete alusel selgus, et olenemata kasutatavast filtrist tulid resuldeeruvad pingetundlikkustegurid kõigi andmete puhul väga sarnased. Olulisem mõju pingetundlikkusteguri väärtusele oli aga mõõteandmete vahemikul, mida kasutati-pingetundlikkustegur ei olnud mõõtmiste kogupikkuses täiesti konstantne. Mõõtmiste alguses olid koormuse muutused paremini eristatavad ning koormuse pingetundlikkusteguri väärtus oli suurem. Mõõtmiste lõpus oli koormus oluliselt ebastabiilsem ning pinge mõju koormusele raskemini eristatav- suuresti ka seetõttu ei leitud ka vähemruutude meetodil pinge ja koormuse nii suurt korrelatsiooni ning pingetundlikkusteguri väärtus tuli väiksem. Analüüsides kogu mõõtmist tervikuna jäi summaarne pingetundlikkustegur katse alguses ja katse lõpus leitu vahele.

Koormuse pingetundlikkusteguri leidmisel kogu mõõtmistulemuse ulatuses logaritmimeist kasutades ilmnesisid esimesed puudused olukorras, mis oli lähedane baastingimustele ehk

koormuse ja pinge normeeritud väärtused olid lähedal ühele. Sel juhul ei olnud võimalik koormuse pingetundlikkust usaldusväärselt eksponentfunktsiooni kasutades leida. Seetõttu ei võetud mõõtetulemusi katse alguses ja lõpus, mis vastasid praktiliselt baastingimustele, koormuse pingetundlikkusteguri leidmisel arvesse. Pingetundlikkustegur logaritmime teel leiti lõpuks sobivate pingetundlikkustegurite keskmisena.

Nii vähemruutude kui ka logaritmime teel leitud koormuse pingetundlikkustegurid tulid võrdlemisi väikse väärtusega- tunduvalt väiksemaga kui teises punktis tarbijagruppide osakaalude alusel leitud aktiivkoormuse pingetundlikkus. Logaritmime teel leitud pingetundlikkuse väärtus oli vähemruutude teel leitud pisut väiksem jäädes 0,40 juurde. Vähemruutude meetodil saadi koormuse pingetundlikkusteguriks kogu mõõtmiste ulatuses filtreerimata ja Savitzky-Golay filtrit kasutades 0,46..0,47 juurde, mis on suhteliselt lähedane logaritmides saadud tulemusele. Liikuvat keskmist kasutades saadi tulemuseks aga suurem pingetundlikkustegur - kõigi mõõtetulemuste alusel jäi see 0,57...0,63 vahele. Kuna liikuv keskmine filtreeris välja enamiku suuremaid koormuse kõikumisi leiti vähemruutude meetodit kasutades stabiilsemal koormusel ja pingel tugevam korrelatsioon, mis väljendus suuremas pingetundlikkusteguris. Kuna liikuv keskmine võib lisaks mürale välja filtreerida ja koormuse tegelikke kiiremaid muutusi tuleb antud tulemusse suhtuda kriitiliselt.

Reaktiivvõimsuse pingetundlikkust mõõteandmete põhjal ei leitud, sest puudusid usaldusväärsed andmed reaktiivvõimsuse tootmisest ja tarbimisest ning trafo fiidri reaktiivvõimsust hoitakse automaatselt juhitavate kondensaatorpatareide abil nulli juures. Seetõttu ei olnud võimalik tõsiseltvõetavaid tulemusi saada.

## Lõputöö kokkuvõte

Seoses hajatootjate populaarsuse olulise suurenemisega on muutumas elektrivõrkude traditsiooniline struktuur. Kui varasemalt toodeti elektrienergiat suurtes tsentraalsetes peamiselt taastumatutel energiaallikatel põhinevates elektrijaamades ning toimetati tarbijateni pikki ülekandeliine kasutades, siis järjest kiirenevas tempos lisandub elektrivõrkudesse peamiselt taastuvatel energiaallikatel põhinevaid hajatootjaid.

Genereerimise detsentraliseerumisel võib olla oluline positiivne mõju seoses kadude vähendamisega ülekandeliinides, kuna elektrienergia genereerimine toimub tarbijate läheduses, kuid sellel võib olla ka suuri negatiivseid mõjusid. Suurimateks puudusteks hajatootmisseadmete lisandumisel võrkudesse on taastuvatel energiaallikatel põhinevate hajatootmisseadmetetootmise, nagu elektrituulikute või päikeseparkide, tootmise juhuslikkus.

Hajatootmisseadmed jaotatakse sõltuvalt tehnoloogiast tavaliselt asünkroon- ja sünkroongeneraatoripõhisteks ning konverteri kaudu võrku ühendatud hajatootmisseadmeteks. Erineva tehnoloogiaga hajatootmisseadmetel on tehnoloogiliste eripärade tõttu erinev mõju võrgule.

Kõige tihemini esinevateks anormaalseteks võrgus on pingelohud, mis on tihtipeale põhjustatud lühistest. Erinevate kirjandusallikate põhjal omasid pingelohkude korral võrgule kõige suuremat positiivset mõju sünkroongeneraatoril põhinevad hajatootmisseadmed. Nende mõju oli eriti tuntav kõrgepingevõrkudes, kus nad aitasid kaasa pingekvaliteedi suurenemisele. Suuresti oli see seotud sünkroongeneraatorite võimega pingelohkude korral reaktiivenergiat genereerida. Samas ka madalpingevõrkudes omasid sünkroongeneraatoripõhised hajatootmisseadmed positiivset mõju.

Konverteripõhised hajatootmisseadmed kõrgepingevõrkudes märkimisväärset positiivset mõju ei oma. See on põhjustatud sellest, et konverterid töötavad enamasti võimsusteguriga 1 ning konverteri nimiparameetritest, mis ei luba võrku antavat võimsust lühiajaliselt pingelohkude korral suurendada. Madalpingevõrkudes, kus reaktiivenergia genereerimine nii suurt tähtsust ei oma, leiti konverteripõhistel tootmisseadmetel olevat märkimisväärne mõju pingelohu sügavuse vähendamisele.

Uuringutes leiti, et asünkroongeneraatoripõhistel hajatootjatel on negatiivne mõju võrgu pingetasemele seoses nende suure reaktiivenergia tarbimisega. Samas aitavad need sarnaselt sünkroongeneraatoritele pingelohu sügavust kõrgepingevõrkudes vähendada.

Tihti peale piisava tähelepanuta jääval koormuste modelleerimisel on oluline osa võrgu stabiilsusarvutustes. Välja on töötatud erinevaid koormusmudeleid, mida kasutatakse sõltuvalt modelleerimise eesmärgist ning modelleeritava koormuse struktuurist. Koormusmudelid jaotatakse peamiselt staatilisteks ja dünaamilisteks.

Staatilisi koormusmudeleid kasutatakse olukorras, kus koormusele mõjuvad lihtsad, toimumisajast sõltumatud pinged või sageduse muutused. Staatilisi koormusmudeleid kasutatakse peamiselt parameetrite arvutamiseks püsiolukorras ning püsiolukorra simuleerimiseks. Dünaamilised koormusmudelid on aga ajast sõltuvad. Neid kasutatakse süsteemi dünaamika uurimisel ehk uuritakse süsteemi käitumist peale suuremaid või väiksemaid häiringuid.

Sõlmekoormuste ekvivalentsete karakteristikute hindamiseks kasutatakse komponendipõhist ja mõõtmispõhist lähenemisviisi. Esimesel juhul peab teadma koormuse kompositsiooni ja selle komponentide karakteristikuid. Mõõtmispõhises lähenemises määratakse koormuse karakteristikud aga mõõtmise tulemusel. Mõõtmispõhine lähenemisviis on küll usaldusväärsem kuid igas olukorras seda kasutada ei ole võimalik.

Levinumad staatilised koormusmudelid on eksponentmudel, polünoom- ehk ZIP-mudel, lineaarmudel, komposiitmudel ja asünkroonmootori staatiline mudel. Dünaamilistest koormusmudelitest on levinumad dünaamiline eksponentmudel, asünkroonmootori dünaamiline mudel ja asünkroonmootori ülekandefunktsiooni mudel.

Modelleerimaks tarkvaras PSCAD suure hajatootjatega Sikassaare alajaama leiti kõigepealt tarbijate tüüpgruppide tarbimisandmete ja kirjanduses toodud koormusgruppide pingestundlikkustegurite alusel esialgsed aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingestundlikkustegurid.

Sikassaare alajaama esimese sektsiooni mudel, kuhu oli agregeeritud kogu sektsiooni koormus ning lisatud hajatootjad, loodi tarkvaras PSCAD. Antud mudeli põhjal katsetati erinevaid stsenaariumeid, mille käigus uuriti hajatootjate mõjukoormuse pingestundlikkusele. Simulatsioonis modelleeriti ideaaljuhtu, mille abil koormuse pingestundlikkuse määramise meetodeid valideerida ning hajatootjate käitumist ideaalsetes tingimustes uurida.

Mudeli simulatsiooni väljundandemete alusel oli võimalik arvutustarkvaras MATLAB vähemruutude meetodil leida koormuse pinngestundlikkustegureid. Mudelist eksporditud andmetes ei olnud mõõteviga ega muid reaalsete koormuse pingestundlikkuse määramiseks



tehtavate mõõtmistega seotud ebatäpsusi, mille tõttu olid arvutatud pingetundlikkustegurid väga täpsed.

Mudeli abil uuriti esmalt hajatootjate mõju trafo koormusele muutes nende osakaalu kogukoormusesse. Saadud tulemuste alusel leiti, et  $\cos \varphi$  režiimis võimsusteguriga üks töötavatel hajatootjatel, mis reaktiivenergiat ei genereeri, pole mõju reaktiivkoormuse pingetundlikkusele. Antud tulemus vastas ootustele. Trafo aktiivkoormuse pingetundlikkus aga suurenes hajatootjate osakaalu suurenemisel eksponentsiaalselt. Ideaalsel juhul, võimsuskadusid mitte arvestades hajatootjate osakaalu lähenemisel 100%-le läheneb trafo aktiivkoormus nullile ning trafo pingetundlikkustegur lõpmatuks. See juhtub kui hajatootjad töötavad konstantse koormusena, mis pingetundlikkusteguril ei muuda. Seetõttu kompenseerib tarbitava aktiivvõimsuse muutuse täies ulatuses trafo oma koormuse muutumisega. Hajatootjate osakaalu suurenemisel väheneb aga trafo koormus, kuid kompenseeritav tarbimise muutus jääb samaks. Seetõttu muutub trafo seisukohast pingetundlikkustegur muutumisel koormus suure hajatootjate osakaalu korral proportsionaalselt rohkem.

Teise katse abil valideeriti meetodit tarbitava koormuse pingetundlikkusteguri leidmiseks sõltumata hajatootmise osakaalust. Hajatootjad olid sel katses samuti  $\cos \varphi$  režiimis pingetundlikkusteguriga üks. Selleks leiti tegelik kogukoormus liites tootmine trafo koormusele. Arvutusliku kogukoormuse ja sektsiooni pingetundlikkusteguri abil leiti mudeli agregeeritud koormuse aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkustegurid. Tulemused ühtisid sisestatud andmetega, mis tõestab, et teades lisaks trafo koormusele kogu tootmist katse ulatuses, on võimalik elimineerida hajatootjate mõju ja leida alajaama tarbitava koormuse pingetundlikkus.

Sarnased katsed tehti läbi ka  $\cos \varphi$  režiimis töötavate hajatootjatega võimsusteguriga 0,8 kontrollimaks kas ka reaktiivvõimsust tootvate seadmetega eelmistes katsetes saadud tulemused kehtivad. Mõlema katse tulemused kinnitasid, et esimeses kahes katses saadud tulemused kehtivad ka hajatootjate puhul võimsusteguriga 0,8. Reaktiivvõimsuse tarbimine oli mudelis väikese väärtusega, mille tõttu ületas tootmine kolmandas ja neljandas katses selle tarbimise. Ajal, mil trafo koormus oli nulli lähedal, oli pingetundlikkuse absoluutväärtus suur. Kui trafo reaktiivkoormus läks nullist väiksemaks, ehk reaktiivvõimsuse genereerimine ületas tarbimise, muutis trafo reaktiivkoormuse pingetundlikkuse tegur märki ja muutus negatiivseks. Selline käitumine toimiks ka aktiivvõimsuse korral, kuid antud mudelis ei ületanud aktiivvõimsuse genereerimine hajatootjate poolt kordagi selle tarbimist.

Viimaks uuriti hajatootjate mõju sõltuvalt koormuse pingetundlikkusest. Sõltuvus leiti olevat lineaarne. Katse tehti  $\cos \varphi$  režiimis töötavate hajatootjatega võimsusteguriga 1. Kuna reaktiivvõimsuse genereerimist hajatootjate poolt ei toimunud, ei omanud need ka oodatult mõju reaktiivkoormuse pingetundlikkusele. Aktiivvõimsuse genereerimisel 50% ulatuses kogutarbimisest suurenes trafo mõjuv aktiivkoormuse pingetundlikkus kõigi aktiivkoormuse pingetundlikkustegurite juures keskmiselt kahekordseks.

PSCAD mudeli abil tehtud simulatsioonide olulisemad tulemused, millest lähtuti ka mõõtmistulemuste alusel koormuse pingetundlikkustegurite leidmisel, olid järgmised:

- $\cos \varphi$  režiimis võimsusteguriga 1 töötavatel hajatootjatel, mis reaktiivenergiat ei genereeri, pole mõju reaktiivkoormuse pingetundlikkusele
- $\cos \varphi$  režiimis töötavat hajatootmisseadet võib modelleerida konstantse koormusena
- trafo aktiivkoormuse pingetundlikkus suureneb hajatootjate osakaalu suurenemisel eksponentsiaalselt
- ideaalsel juhul, võimsuskadusid mitte arvestades, hajatootjate osakaalu lähenemisel 100%-le läheneb trafo aktiivkoormus nullile ning trafo aktiivkoormuse pingetundlikkustegur lõpmatusele
- trafo reaktiivvõimsuse pingetundlikkus suureneb reaktiivvõimsust tootvate hajatootmisseadmete osakaalu suurenemisel eksponentsiaalselt
- liites tootmisseadmete poolt toodetava võimsuse trafo koormusele saab leida koormuse pingetundlikkustegurid hajatootjate osakaalust sõltumata
- kui hajatootjate aktiiv- või reaktiivvõimsuse genereerimine ületab summaarse tarbimise, siis muutub koormuse pingetundlikkusteguri märk vastupidiseks
- koormuse pingetundlikkustegurite muutumisel muutub summaarne koormuse pingetundlikkustegur lineaarselt pingetundlikkusteguri muutusega samas suunas

Töö viimases peatükis rakendati varasemalt leitud teoreetilisi aluseid Sikassaare alajaamas tehtud reaalsele mõõtmistele. Mõõdeti alajaama esimeses sektsioonis trafo koormust ja sektsiooni pinget. Samuti kasutati SCADA-st pärit andmeid tootmise kohta, mis olid väiksema mõõtetihedusega kui alajaamast mõõdetud tulemused. Seetõttu tuli mõõtetulemuste tihedus MATLAB-is matemaatiliselt *resample* funktsiooniga võrdsustada, selleks, et oleks võimalik neid liita ja sellega kogukoormust leida.

Mõõteandmete muutumise tõttu ajas kasutati nende stabiliseerimiseks erineva sammuga filtreid- liikuvat keskmist ja Savitzky-Golay filtrit. Filtreeritud mõõteandmete abil on

võimalik leitud aktiivkoormuse pingetundlikkusteguri tõepärasusele hinnang anda. Filtreerimata andmed kõiguvad liiga suure amplituudiga, et oleks võimalik pinge muutumisest põhjustatud koormuse muutusi eristada juhuslikest koormuse muutustest. Samuti võrreldi filtreeritud andmete alusel leitud koormuse pingetundlikkustegureid filtreerimata andmete põhjal leitudega ning järeldati, et filtreerimine andmete kvaliteeti ei mõjutanud. Liikuva keskmise filter silus tulemusi efektiivsemalt, kuid sellega seoses võis välja filtreerida lisaks mürale ka tegelikke pingest sõltuvaid koormuse muutusi. Savitzky-Golay filter seevastu järgis sisndsignaali täpsemini ja silus sellest lähtuvalt müra pisut vähem.

Koormuse pingetundlikkust leiti kahel meetodil- kolmandas peatükis kasutatava vähemruutude meetodi abil ning matemaatiliselt tuletatud logaritmimise teel. Vähemruutude meetodil koormuse pingetundlikkust leides selgus, et katse esimeses pooles reageeris aktiivkoormus pinge muutustele selgemini ning seetõttu oli selle pingetundlikkustegur katse alguses suurema väärtusega kui katse lõpus, mil koormus oli palju ebahütlasem ning selget pinge muutusest põhjustatud koormusemuutust oli raskem ära tunda. Kogu mõõtetulemuste summaarne aktiivvõimsuse pingetundlikkustegur tuli katse alguse ja lõpu pingetundlikkuste vahepealne.

Reaktiivkoormuse pingetundlikkust mõõteandmete põhjal ei leitud, sest trafo reaktiivkoormust hoitakse kondensaatorpatareidega automaatselt reaktiivvõimsust kompenseerides nulli lähedal. Kuna kondensaatorpatareide sisse-väljalülitamisi täpselt teada polnud, ei olnud võimalik ka reaktiivkoormuse pingetundlikkustegurit adekvaatselt leida.

Viimaks leiti aktiivkoormuse pingetundlikkustegurit logaritmimise teel. Mõõtetulemused normeeriti ära normaaltingimuste suhtes. Normaaltingimustes leitud mõõteandmete korral oli normeeritud koormus aga 1 suhtühiku lähedal ja selle logaritmimisel tuli aktiivkoormuse pingetundlikkustegur ebareaalselt suure absoluutväärtusega, mistõttu need tulemused elimineeriti ülejäänud arvutustest. Järele jäänud mõõtetulemustest leiti keskmine, mis oligi aktiivkoormuse pingetundlikkusteguriks.

Nii vähemruutude meetodil kui ka logaritmimisel tulid aktiivkoormuse pingetundlikkustegurid väikese absoluutväärtusega, kuid üsna sarnased. Nende väärtused kasutatavatest filtritest enamikul juhtudest ei sõltunud. Kuna tootmise sisendandmed ei olnud nii täpsed kui trafo koormuse mõõtmised, ei olnud võimalik pingetundlikkust ka nii suure täpsusega määrata, kuid saadud tulemuste alusel võib eeldada, et see jääb 0,4 ja 0,6 vahele. Tulemus on sellegi poolest väiksem kui tarbimisandmete ja teoreetiliste koormusklasside

pingetundlikkustegurite kaudu arvatud tulemused. Mõõtmisandmete põhjal saadud vastus on siiski tunduvalt usaldusväärsem, sest koormusklasside alusel leitud suuruse leidmisel toetuti peamiselt mõnda aega tagasi leitud pingesõltuvusteguritele. Praeguseks ei pruugi need enam nii täpsed olla seoses koormuse üldise struktuuri muutumisega näiteks elektroonse koormuse osakaalu olulise kasvamise tõttu.

Töö põhilised eesmärgid, milleks olid teoreetiliselt ning mudeli abil uurida hajatootjate mõju sõlmekoormustele ning seejärel mudeli abil valideerida mõõtmisandmete alusel koormuse pingetundlikkustegurite leidmise metoodikat said edukalt täidetud. Seejärel rakendati saadud teadmisi reaalsele juhule ning Sikassaare alajaama mõõtmistulemuste alusel leiti kahel meetodil antud alajaama esimese sektsiooni aktiivkoormuse pingetundlikkustegur.

Käesolev töö uuris hajatootjate mõju koormusele nii teoreetiliselt kui ka praktiliselt, on teema siiski niivõrd lai, et edasised uuringud antud teemal on vajalikud koormuse käitumise piisava täpsusega modelleerimiseks.

# Kirjandus

- [1] Khani, Davood, A. S. Yazdankhah ja H. M. Kojabadi, „Impacts of distributed generations on power system transient and voltage stability,“ *Electrical Power and Energy Systems*, nr 43, pp. 488-500, 2012.
- [2] V. Vita, T. Alimardan ja L. Ekonomou, „The Impact of Distributed Generation in the Distribution Networks' Voltage Profile and Energy Losses,“ *IEEE European Modelling Symposium*, Madrid, 2015.
- [3] T. Matlokotsi ja S. Chowdhuri, „Voltage and Frequency Profile Analysis of Electricity and Wind Energy Integration“.
- [4] B. Renders, K. De Gusseme, W. R. Ryckaert, K. Stockman, L. Vandeveldel ja M. H. Bollen, „Distributed Generation for Mitigating Voltage Dips in Low-Voltage Distribution Grids,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, kd. 23, nr 3, 2008.
- [5] A. Ogunjuyigbe, T. Ayodele ja O. Akinola, „Impact of distributed generators on the power loss and voltage profile of sub-transmission network,“ *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, nr 3, pp. 94-107, 2016.
- [6] M. Meldorf ja J. Kilter, *Elektrisüsteemi stabiilsus*, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2011.
- [7] T. Lehtla, *Elektriamid*, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2007.
- [8] A. Voldek, *Elektrimasinad II*, Tallinn: Kirjastus "Valgus", 1973.
- [9] R. Aavik, „Asünkroonmootorite modelleerimine PSCAD tarkvara võrguarvutustes,“ Tallinn, 2017.
- [10] Q.-C. Zhong ja T. Hornik, *Control of Power Inverters in Renewable Energy and Smart Grid Integration*, West Sussex: IEEE Press, 2013.
- [11] V. Aunapuu, „Koormuse mõju sünkroongeneraatori talitlusele,“ Tallinn, 2016.
- [12] A. Engler, „Control of inverters in isolated and in grid tied operation with regard to expendability in tutorial: Power Electronics fo Regenerative Energy,“ Aachen, 2004.

- [13] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg ja P. Rodriguez, „Control of Power Converters in AC Microgrids,“ *IEEE Transactions on Power Electronics*, kd. 27, nr 11, pp. 4734 - 4749, 2012.
- [14] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley ja Strbac, G., *Embedded Generation*, 31st toim., Bristol, U.K.: Institute of Electrical Engineering, 2000.
- [15] M. Bollen, *Understanding Power Quality Problems*, Piscataway, NJ: IEEE Press, 2000.
- [16] N. K. Roy, M. J. Hossain ja H. R. Pota, „Effects of Load Modelling in Power Distribution System with Distributed Wind Generation,“ *Power Engineering Conference (AUPEC)*, Brisbane, 2011.
- [17] S. Kjaer, J. Pedersen ja F. Blaabjerg, „A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules,“ *IEEE Transactions on Industry Applications*, kd. 41, nr 5, pp. 1292-1306, 2005.
- [18] P. M. Carvalho, P. F. Correia ja L. A. Ferreira, „Distributed Reactive Power Generation Control for Voltage Rise Mitigation in Distribution Networks,“ *IEEE transactions on Power Systems*, kd. 23, nr 2, 2008.
- [19] Võrgueeskiri - Riigiteataja I 16.02.2016, 14.
- [20] Elering AS, „Elering AS elektri põhivõrguga liitumise tingimused,“ 2017.
- [21] J. V. Milanovic, „On unreliability of exponential load models,“ *Electric Power Systems Research*, pp. 1-9, 1999.
- [22] Ü. Treufeldt, M. Leinakse, U. Salumäe, T. Sarnet, M. Meldorf, J. Kilter, A. Reinson ja I. Dvortar, „Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud I etapi lõpparuanne,“ Tallinn, 2015.
- [23] V. Knyazkin, C. A. Canizares ja L. H. Söder, „On the Parameter Estimation and Modelling of Aggregate Power System Loads,“ *IEEE Transactions on Power Systems*, kd. 19, nr 2, pp. 1023-1031, 2004.
- [24] D. P. Stojanovic, L. M. Korunovic ja J. Milanovic, „Dynamic load modelling based on measurements in medium voltage distribution network,“ *Electric Power Systems Research*, kd. 78, pp. 228-238, 2008.

- [25] Cigre Working Group, „Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks,“ 2014.
- [26] E. Karin, „Kodutarbijate tüüpkoormusseadmete pingekarakteristikute modelleerimine tarkvaraga PSCAD,“ Tallinn, 2017.
- [27] P. Kundur, Power System Stability and Control, New York: McGraw-Hill, Inc., 1993.
- [28] Ü. Treufeldt, M. Meldorf, M. Leinakse, T. Sarnet, U. Salumäe, J. Kilter, K. Krusell, A. Reinson ja I. Matjas, „Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud II etapi lõpparuanne,“ Tallinn, 2016.
- [29] A. Rosin, I. Dvortar, S. Link, H. Hõimoja, .. Mölder ja T. Möller, „Tarbimise juhtimine: suurtarbijate koormusgraafikute salvestamine ning analüüs tarbimise juhtimise rakendamise võimaluste tuvastamiseks,“ Elering, 2014.
- [30] Elering AS, „Mikrotootjate andmetabel,“ Tallinn, 2016.
- [31] Doctoral School of Energy and Geotechnology, „Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering,“ *16th International Symposium*, Pärnu, 2017.
- [32] Mathworks, May 2017. [Online]. Available: <https://se.mathworks.com/help/signal/examples/signal-smoothing.html>.

# Lisad

L.1. Elektrilevi tarbijate tüüpgrupid

L.2. PSCAD skeem



## L.1. Elektrilevi tarbijate tüüpgrupid

Tüüpgrupp	Koormuse tüüp	Tüüpgrupp	Koormuse tüüp
1	Eramud, akumuleeriv elekterküte Eramud, vahetu elekterküte Eramud, segaküte (elekter + muu) Eramud, muu küte Kortere lamud, el.pliit + lift Kortere lamud, el.pliit ilma liftita Kortere lamud, gaas + lift Kortere lamud, gaas ilma liftita Kortere lamud, el.küte Kortere lamud, ahjuküte Suvilad ja abihooned, suvilad ja Aiamajad Suvilad ja abihooned, abihooned Suvilad ja abihooned, garaažiühistud Suvilad ja abihooned, suvilaühistud		Tööstus I vah., toiduainetetööstus Tööstus I vah., tekstiilitööstus Tööstus I vah., puidutööstus Tööstus I vah., trükitööstus Tööstus I vah., keemiatööstus Tööstus I vah., metallitööstus Tööstus I vah., ehitusmaterjalid Tööstus I vah., esmatarbekaubad Tööstus I vah., mäetööstus Tööstus I vah., elekterside ettevõtted Tööstus I vah., pumbajaamad Tööstus I vah., veepuhastusjaamad Tööstus I vah., katlamajad Tööstus I vah., TV studiod Tööstus II vah., toiduainetetööstus
2	Karjakasvatus, talud Karjakasvatus, piimafarm Karjakasvatus, lihafarm Karjakasvatus, linnufarm Taimekasvatus, kasvuhooned Taimekasvatus, kuivatid Taimekasvatus, söödatootmine Taimekasvatus, vihmudid Kalandus, kalakasvatus		
3	Kontorid ja firmad Kaubandus, kioskid Kaubandus, kauplused Kaubandus, kaubanduskesk-d ja Kaubamajad Kaubandus, laod Kaubandus, turud Teenindus, salongid ja ateljeed Teenindus, remonttöökodad Teenindus, saunad Teenindus, pesumajad Teenindus, majutusasutused Teenindus, toitlustusettevõtted Teenindus, tanklad Teenindus, postkontorid Tervishoid, polikliinikud Tervishoid, haiglad Tervishoid, sanatooriumid Muu, vanadekodud Muu, lastekodud Muu, vanglad ja kolooniad Muu, segakoormus	4	
5	Ühisk. hooned, vaba-aja keskused Ühisk. hooned, kinod ja teatrid Ühisk. hooned, raamatukogud Ühisk. hooned, spordikompleksid Ühisk. hooned, muuseumid ja näitused Ühisk. hooned, kultusehooned Ühisk. hooned, lasteaiad Ühisk. hooned, koolid Ühisk. hooned, Kõrg- ja ülikoolid Muu, tänavavalgustus Muu, sõjaväeosad		

# L.2. PSCAD skeem

