



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
ELEKTROENERGEETIKA JA MEHHATROONIKA INSTITUUT

Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud

Uurimistö 1.1-4/2015/227/ Lep 15066 lõpparuanne

Tallinn 2017

Uurimistöö täitjad:

Ülo Treufeldt	dotsent, tellimustöö vastutav täitja, TTÜ elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut
Mati Meldorf	emeriitprofessor, TTÜ elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut
Madis Leinakse	doktorant, nooremteadur, TTÜ elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut
Tanel Sarnet	doktorant, nooremteadur, TTÜ elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut
Uku Salumäe	insener, TTÜ elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut



Jako Kilter	PhD, elektrisüsteemi ekspert, „Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud“ R&D projekti juht, Elering AS
Kaur Krusell	energiasüsteemi juhtimiskeskuse töökindluse spetsialist, Elering AS
Andrus Reinson	releekaitse ja automaatika talituse juhataja, Elering AS
Ilja Matjas	energiasüsteemi planeerimise talituse elektrisüsteemi analüütik, Elering AS

SISUKORD

1	Sissejuhatus	5
2	Koormusklasside koormuskoosseisud.....	8
2.1	Kodutarbijad	9
2.1.1	Kodutarbijate suvine koormuskoosseis	10
2.1.2	Kodutarbijate talvine koormuskoosseis	11
2.2	Põllumajandus	14
2.3	Äri- ja avalik teenindus.....	15
2.4	Tööstus.....	16
2.5	Elektrijaamade omatarve	17
2.6	Kokkuvõte	17
2.7	Kasutatud kirjandus	18
3	Staatiliste pingekarakteristikute määramise meetoodika	21
3.1	Koormuskomponentide summeerimine.....	21
3.1.1	Koormuskomponentide reaktiivvõimsuste osakaalud ja summaarse koormuse võimsustegur	23
3.1.2	N koormuskomponendi tarbitav summaarne võimsus	25
3.1.3	N koormuskomponendi summaarsed pingekarakteristikud	26
3.2	Staatiliste pingekarakteristikute teisendamine.....	28
3.2.1	PSSE ja PSCAD staatilised koormusmodelid	28
3.2.2	Koormusmodeli parameetrite teisendamise meetodid	35
3.2.3	Teisendustäpsus võrdleva modelleerimise põhjal	39
3.3	Koormusklasside pingekarakteristikute tuletamine.....	44
3.3.1	Koormuskomponentide pingetundlikkuse tegurid	44
3.3.2	Koormusklasside pingetundlikkuse tegurid	52
3.3.3	Võrdlus kirjandusega.....	54
3.4	Sõlmekoormuste pingekarakteristikute tuletamine	58
3.5	Kokkuvõte	58
3.6	Kasutatud kirjandus	59
4	Pingekarakteristikute katselise määramise võimalused	62
4.1	Teostatud katsete meetoodika	62
4.1.1	Pingemuutuste teostamine ning mõõtmine	62
4.1.2	Koormusmodeli pingetundlikkustegurite väärtuste tuvastamine	64
4.2	Talviste katsete tulemused.....	65

4.2.1	Järveküla (30.12.2016).....	65
4.2.2	Endla (07.02.2017).....	69
4.2.3	Ida (07.02.2017).....	71
4.2.4	Kadaka (08.02.2017).....	74
4.3	Kokkuvõte	76
4.4	Kasutatud kirjandus	77
5	Sõlmekoormuste sageduskarakteristikud	78
5.1	Sõlmekoormuste sageduskarakteristikute leidmise põhimõte.....	78
5.2	Koormuskomponentide sageduskarakteristikud.....	78
5.2.1	Koormuskomponendid ja sagedustundlikkuse arvestamine.....	78
5.2.2	Koormuskomponentide sagedustundlikkuse tegurid	81
5.2.3	Koormuskomponentide sagedustundlikkuse tegurid ja osakaalud koormusklassides	85
5.3	Koormusklasside sageduskarakteristikud.....	90
5.4	Koormussõlmede staatilised sageduskarakteristikud	94
5.5	Kokkuvõte	97
5.6	Kasutatud kirjandus	97
6	Kokkuvõte	99

1 Sissejuhatus

Käesoleva projekti lõppetapi põhieesmärgiks oli leida kõikidele 110 kV võrgu ca 200 sõlme aktiiv- ja reaktiivkoormustele adekvaatsed pinge- ja sageduskarakteristikud.

Sõlmekoormuste pinge- ja sagedussõltuvuste karakteristikute leidmisel on võimalikud kaks lähenemisviisi:

- mõõteandmetel põhinevad meetodid
- tarbimisstruktuuride analüüsil põhinevad meetodid e komponentide põhised meetodid.

Mõõteandmetel põhinevate meetodite rakendamiseks vajalike andmete allikaid on kolm:

- SCADA poolt salvestatud statistilised mõõteandmed (aegread)
- aktiivsete katsete mõõtmistulemused
- rikkesalvestite andmed

SCADA tunniandmete põhjal uuriti koormuse staatilisi pinge- ja sagedussõltuvusi koormuse matemaatilise mudeli abil. Matemaatilise mudeli rakendamine sõlmekoormuste pinge- ja sageduskarakteristikute selgitamisel ei andnud oodatud tulemusi pinge ja sageduse suure stabiilsuse tõttu 110 kV võrgu sõlmedes, mis ei võimaldanud leida usaldatavaid korrelatiivseid seoseid pinge ja koormuse ning sageduse ja koormuse vahel.

Aktiivsete pingekatsete tegemisel reaalses võrgus on võimalik tekitada vaid suhteliselt väikesi pingehälbeid. Seetõttu on katsetel saadud andmed kasutatavad eelkõige staatiliste pingekarakteristikute tuletamiseks. Meetodi laialdast rakendamist sõlmekoormuste karakteristikute leidmisel piiravad mõõtmiste teostamiseks sobilike mõõteseadmete piiratud arv, katsete korraldamise ning tulemuste analüüsi ajamahukus. Võrgu seisukohalt põhjustavad aktiivsed katsed täiendavate lülituste teostamise ning pingepiiride lähedaste talitluste kasutamise. Täiendavad lülitused vähendavad seadmete eluiga ning pingepiiride lähedased talitlused võivad põhjustada ootamatuid koormuslülitusi ning releekaitse rakendumisi. Seetõttu on katseliste määramise korral risk jaotusvõrgu ning klientide poolsete kaebuste arvu suurenemiseks. Siiski on senised katsed tõestanud meetodi efektiivsust ja vajadust teha aktiivseid katseid ka edaspidi.

Rikkesalvestite andmed võimaldavad uurida ka suurte pingehälvete mõju koormusele ja on seetõttu kasutatavad ka dünaamiliste pingekarakteristikute määramisel. Samuti vastab rikkesalvestite mõõtesagedus dünaamiliste koormusmudelite parameetrite määramiseks tarvilikult mõõtesagedusele. Siiski ei ole kõik koormused rikkesalvestitega jälgitavad ning

pingekarakteristikute tuvastamiseks sobilike salvestiste otsimine rikkesalvestite mõõteandmete andmebaasist on tömahukas ning eeldab otsinguprogrammi koostamist.

Sagedussõltuvuste uurimiseks vajalikke sagedushälvete mõõteandmeid ei ole olemas elektrisüsteemi sageduse suure stabiilsuse tõttu. Aktiivsed sageduskatsed eeldaksid võimalust tekitada süsteemis saartalitlusi ja seejärel muutes sagedust teatud piirides uurida sõlmekoormuste reaktsioone sageduse muutustele. Selliseid eksperimente reaalses süstemis teha ei ole võimalik.

Tulenevalt mõõtmispõhiste meetoditega seotud raskustest kõikidele 110 kV sõlmede koormustele pinge- ja sageduskarakteristikute määramisel on käesolevas projektis aluseks võetud tarbimisstruktuuride analüüsil põhinev lähenemine, mida kontrollitakse ja täiendatakse mõõtmispõhiste meetodite tulemustega vastavalt mõõteandmete olemasolule.

Rakendatava komponentidepõhise meetodi kohaselt vaadeldakse sõlmekoormusi koosnevana koormusklasside koormustest ja koormusklasside koormusi koosnevana mitmesugustest, vaadeldavasse koormusklassi kuuluvate tarbimisseadmete e koormuskomponentide koormustest. Kasutatakse nn „alt-üles“ meetodit, mille korral lähtutakse aktiivkoormuse ja reaktiivkoormuse pinge- ja sagedussõltuvuste kindlakstegemisest iseloomulikele koormuskomponentidele. Edasi, teades koormuskomponentide aktiiv- ja reaktiivkoormuste osakaale koormusklassides, saab leida koormusklasside aktiiv- ja reaktiivkoormustele pinge- ja sageduskarakteristikud. Teades koormusklasside struktuuri ja osakaale koormussõlmedes, arvutatakse lõpptulemusena välja kõikide vaadeldavate koormussõlmede aktiiv- ja reaktiivkoormuste pinge- ja sagedussõltuvused. Koormusklasside osakaale koormussõlmedes on võimalik määrata lähtudes võrguoperaatorite kliendiandmebaasidest. Käesolevas projektis on kasutatud koormusklasside osakaalude määramiseks VKG Energia, VKG Elektrivõrgud, Elektrilevi ja Eleringi andmeid.

Pingesõltuvusi kirjeldavate mudelite korral on oluline nii mudeli matemaatiline kuju (lineaarne, eksponent, polünoom, ZIP jms) kui ka mudeli parameetrid. Mudelite kujud on esmajoones seotud pingesõltuvuste arvestamisega programmides PSCAD ja PSS/E, kus kasutatakse erinevaid mudeleid. Erinevate mudelite kasutamisel muutub oluliseks mudeli parameetrite teisendamine ühelt mudelikujult teisele.

Sagedussõltuvusi modelleeritakse nii PSCAD kui ka PSS/E tarkvarades lineaarsete funktsioonidega. Kuigi üldjuhul suurte sagedushälvete korral ei pruugi sagedussõltuvused olla

lineaarsed, siis realselt esinevate väikeste sageduse kõrvalekallete jaoks on lineariseerimine nimisageduse lähiumbruses põhjendatud ja seega on tegu staatiliste sageduskarakteristikutega.

Kuigi tarbimisstruktuuride analüüsil põhineva meetodi rakendamise tulemusel saadavad karakteristikud on põhimõtteliselt staatilised karakteristikud, võib neid teatud määral kasutada ka dünaamiliste protsesside korral.

Dünaamiliste pingekarakteristikute uurimine eeldab tavaliselt mõõtmispõhist lähenemist. Komponentidepõhine lähenemine on võimalik, kasutades koormuskomponentide dünaamika uurimiseks näiteks PSCAD tarkvara.

Projekti käesolevas lõpparuandes leiavad kajastamist järgmised olulised teemad:

- koormuskomponentide koosseisu ja osakaalude leidmine koormusklassides
- koormuskomponentide pinge- ja sageduskarakteristikute määramine kirjandusallikate analüüsi põhjal
- koormusklasside aktiiv- ja reaktiivkoormuste pinge- ja sagedussõltuvuste leidmine koormuskomponentide karakteristikute ja osakaalude alusel
- koormusklasside osakaalude kindlakstegemine koormussõlmedes
- karakteristikute parameetritele suviste ja talviste väärtuste leidmine
- koormusmudelite teisendamine
- pingekarakteristikute dünaamikaparameetrite leidmine PSS/E tarkvara jaoks
- kõikidele 110 kV võrgu sõlmedele pinge- ja sageduskarakteristikute leidmine
- aktiivsete pingekatsete tulemuste analüüs ja võrdlemine komponentidepõhisel meetodil leitud parameetrite väärtustega

2 Koormusklasside koormuskoosseisud

Koormussõlmede pinge- ja sageduskarakteristikute komponentidel põhineva modelleerimise teostamisel lähtutakse koormuskomponentide ehk tarbimisseadmete osakaaludest koormusklassides ning nende pinge- ja sageduskarakteristikutest. Üksikute koormuskomponentide pinge- ja sageduskarakteristikute summeerimisel lähtudes nende osakaaludest tuvastatakse koormusklasside pinge- ja sageduskarakteristikud, mille summeerimisel saadakse koormussõlmede pinge- ja sageduskarakteristikud. Koormuskomponentide osakaale koormusklassides käsitletakse käesoleva peatüki järgnevatel alapunktides. Koormuskomponentide ning koormusklasside pingekarakteristikuid ja nende summeerimist käsitletakse aruande 3. peatükis. Sageduskarakteristikuid käsitletakse aruande 5. peatükis.

Projekti esimese etapi aruandes [1] lähtuti koormusklasside defineerimisel Elektrilevi AS tarbijate klassifikatsioonist, mille põhjal jagati tarbijad viide koormusklassi:

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

Projekti teise etapi aruandes [2] ühendati avaliku ja teeninduse klassi tarbijad, sest nende ühendamine võimaldas äri- ja avaliku teeninduse sektori koormuskoosseisude analüüsis kasutada varasemalt teostatud uuringute tulemusi [3]. Viimasel koormussõlmede nimekirja täpsustamisel ilmnes, et koormusklasside sekka on otstarbekas lisada elektrijaamade omatarve, sest see moodustab olulise osa elektrienergia tarbimisest ning võib pinge- ja sagedustundlikkuse poolest erineda eelnevalt kasutatud koormusklassidest.

Kokkuvõttes võeti käesolevas aruandes komponendipõhisel koormussõlmede pinge- ja sageduskarakteristikute määramisel aluseks järgnevad koormusklassid:

- 1) Kodutarbijad: eramud, korterelamud ja suvilad.
- 2) Põllumajandus: karjakasvatus, taimekasvatus ja kalandus.
- 3) Äri- ja avalik teenindus: kontorid, kaubandus, teenindus, tervishoid, ühiskondlikud hooned, muu.
- 4) Tööstus: tööstus, transport, transpordibaasid.
- 5) Elektriijaamade omatarve: soojuselektriijaamade omatarve.

Järgnevat alapeatükkides kirjeldatakse loetletud viie koormusklassi koosseisu kuuluvate koormuskomponentide osakaale. Suvine ja talvine tarbimine on eristatud ainult kodutarbijate osas, sest enamiku koormusklasside osas on kasutatud allikates esitatud ainult aasta aktiivenergia tarbimise jaotus seadmete lõikes või on koormuskoosseisude hooajalisust ning perioodilisust käsitletud analüüsi teostamiseks ebapiisavas mahu.

2.1 Kodutarbijad

Eesti Statistikaamet on käsitlenud leibkondade varustatust elektriseadmetega uuringus [4], mille tulemusi on kajastatud tabelis 2.1. Selles tabelis esitatud elektriseadmete osatähtsused iseloomustavad hästi Eesti kodumajapidamistes kasutusel olevate elektriseadmete arvu, kuid ei kirjelda nende seadmete elektrienergia tarbimist. Seetõttu ei piisa kodutarbijate koormuskoosseisude kirjeldamiseks Statistikaameti kogutud andmetest, vaid on tarvilik täiendavate sisendandmete ning eelduste kasutamine.

Eesti kodutarbijate koormuskoosseisude mõõtmisi on kirjeldatud artiklis [5] ning magistritöös [6]. Nimetatud artikli ning magistritöö peamiseks puuduseks on väike valim: mõlemal juhul on mõõdetud ainult ühe korteri koormuskoosseisu. Väikse valimi tõttu ei ole võimalik mõõtetulemusi laiendada kogu kodutarbijate koormusklassile, sest kodutarbijate koormusklassi kuuluvad ka ühepereelamud ning mõõdetud korterites elavate isikute tarbimisharjumused ei pruugi esindada keskmist kodutarbijat. Magistritöö [6] teiseks puuduseks on numbriliste algandmete puudumine. Koormuskoosseisude analüüsiks tarvilikud mõõtetulemused on esitatud ainult raskesti loetava tulpdiagrammina, mis ei võimalda analüüsiks tarvilikke numbrilisi väärtusi üheselt tuvastada.

Lisaks Eesti Statistikaameti kogutud andmetele, eelnevalt nimetatud magistritööle [6] ning artiklile [5] on Eesti kodutarbijate koormuskoosseise uuritud lähtudes kirjandusest magistritöös [7] ning bakalaureusetöös [8]. Käesolevas aruandes järgnevalt kirjeldatud kodutarbijate koormuskoosseisude osas on võetud aluseks peamiselt magistritöös [7] tehtud eeldused ning tuletuskäik. Järgnevalt esitatud arvandmed erinevad kohati lõputöös või eelmise etapi aruandes [2] esitatud andmetest tulenevalt arvutusvigade kõrvaldamisega kaasnenud muutustest. Kodutarbijate suviseid koormuskoosseise on käsitletud alapunktis 2.1.1 ja talviseid koormuskoosseise alapunktis 2.1.2.

Tabel 2.1. Eesti leibkondade varustatud elektriseadmetega, 2010 [4].

Koormuskomponent	Varustatuse osatähtsus [%]
Pesumasin	89,0
Pesumasin-kuivati	1,6
Trummelkuivati	0,9
Nõudepesumasin	15,0
Mullivann	3,2
Veepump	16,0
Külmkapp	99,0
Sügavkülmik	16,0
Tolmuimeja	93,0
Elektripliit	72,0
Elektriahi	19,0
Mikrolaineahi	61,0
Miniköök	3,4
Kohvimasin	21,0
Kineskoobiga teler	62,0
LED- või LCD-teler	41,0
Plasmateler	9,4
3D-teler	0,6
Kodukinosüsteem	12,0
Muusikakeskus, raadio	73,0
DVD-mängija	42,0
Lauaarvuti	46,0
Kaasaskantav arvuti	46,0
Printer	32,0
TV digiboksid ja SAT-TV vastuvõtuseadmed	50,0
Õhukonditsioneer	2,9
Elektriradiaator	24,0
Õhupuhasti	46,0
Saunakeris	4,0
Soojuspump	3,5
Boiler	37,0

2.1.1 Kodutarbijate suvine koormuskoosseis

Magistritöös [7] kasutati kodutarbijate suvise koormuskoosseisu tuvastamiseks eeldusi, et suvel ei kasutata elektrikütte seadmeid, kodutarbijate kasutatavate elektriseadmete koosseis vastab tabelis 2.1 esitatud varustatuse osatähtsustele ning üksikute elektriseadmete energiatarve vastab kirjanduses esitatud tüüpilisele energiatarbele, mis on esitatud tabelis 2.2. tulbana „Seadme keskmine tarbimine [kWh/päev]“. Eesti keskmise kodutarbija energiatarve elektriseadmete lõikes arvutati seadme tüüpilise energiatarve ning varustatuse osatähtsuse korrutisena ning esitati tabelis 2.2 tulbana „Eesti kodutarbija arvutuslik tarbimine [kWh/päev]“.

Päevasiseste koormuskoosseisu muutuste osas on töös [7] esitatud arvamus: „hommikul on rohkem kasutuses söögi tegemiseks vajalikud seadmed (keedukann, röster, pliit, kohvimasin jne.). Õhtul lisanduvad söögitegemiseks vajaminevatele seadmetele ka pesumasinad,

elektroonika ja valgustus, mis on suvel peamiselt õhtusse koondunud (Suurbritannia andmetel 9% kogutarbimisest [9]). Suurbritannias simuleeritud päevast koormusgraafikut [10] analüüsidest hakkab silma, et hommikune ja õhtune koormusstruktuur väga erinevad ei ole - koormused on õhtuti suuremad, osakaalud tunduvad siiski valdavalt samaks jääma.

Muutuvatele osakaaludele lisaks võib konstantse võimsusega võtta seadmed, mis on enamasti terve päeva sees nagu külmkapid, osa elektroonikast (eriti hommikutundidel, kui enamasti elektroonikast on ooterežiimil) ja telefonid. Arvestades, et õhtune tarbimine on suurem, siis antud konstantsete koormuste osakaal pigem õhtuti väheneb.“

Tabel 2.2. Kodutarbija koormusklassi suvine koormuskoosseis [7].

Seade	Seadme keskmine tarbimine [kWh/päev]		Eesti kodutarbija arvutuslik tarbimine [kWh/päev]	Osakaal kodutarbija kogutarbimisest [%]
Elektripliit	1,33	[11]	0,96	10,31
Elektriahi	0,74		0,14	1,52
Mikrolaineahi	0,23		0,14	1,52
Külmkapp	0,82		0,81	8,74
Sügavkülmik	1,90		0,30	3,27
TV	0,91		0,93	10,00
Pesumasin	0,80		0,71	7,67
Kuivati	0,78		0,01	0,13
Nõudepesumasin	1,72		0,26	2,78
Tolmuimeja	0,15		0,14	1,51
Õhukonditsioneer	2,976		[12]	0,09
Miniköök	1,092	0,04		0,41
Arvuti/ kaasaskantav arvuti	0,60	0,43		4,62
Õhupuhasti/ ventilaator	0,60	0,36		3,88
Muusikakeskus/ raadio	0,41	[13]	0,30	3,25
Laadijad	0,20		0,09	0,99
DVD-mängija	0,40	[14]	0,17	1,81
Boiler	6,48		2,40	25,80
Elektrikeris	3,43 ¹	[15]	0,14	1,47
Kohvimasin	0,13	[16]	0,03	0,30
Valgustus	0,84	[9]	0,85	9,09

2.1.2 Kodutarbijate talvine koormuskoosseis

Talvel lisandub võrreldes suvisele koormusele elektriküte, kuid suureneb ka valgustusseadmete tarbimine. Kodutarbijate soojusega varustamist kütteliigi järgi on käsitletud uuringus [4], mille tulemused on esitatud tabelis 2.3, kus erinevate kütteliikide summa ületab 100%. Seetõttu

¹ Elektrikerise keskmise koormuse arvutamisel arvestati, et keskmine keris on võimsusega 6 kW ja seda kasutatakse keskmiselt kord nädalas 4 h. [7]

kasutavad osad kodutarbijad mitut küteliiki. Magistritöös [7] eeldatakse lähtudes tabelis 2.3 esitatud kütteviiside osakaaludest, et kuna kohalik keskküte ja ahjuküte moodustavad 99,9%, seega kõigest 0,1% kodutarbijatest kasutasid ainult elektrikütet või elektril töötavat küttesüsteemi. Samast tabelist selgub, et 3,3% kodumajapidamistest kasutavad soojuspumpasid, kuid need on enamasti kombineeritud mõne teise soojusallikaga. Lisaks elektriküttele kasutas elektrilist põrandakütet veel 15,3% eluruumidest. Magistritöös [7] eeldati, lähtudes asjaolust, et kodumajapidamised, kus on statsionaarselt kasutatud elektrikütet (4,3% [4]), on kütte osakaal talvel ligikaudu pool kogu tarbimisest [3] ja teisaldatavate elektriseadmetega majapidamistes on see tõenäoliselt väiksem, sest kui kütteseade on teisaldatav, siis see viitab väiksemale kasutustegurile. Samuti eeldati magistritöös [7], et leibkondades, kus soojuspumbad on kasutuses, töötavad soojuspumbad maksimaalselt.

Tabel 2.3. Kodumajapidamiste soojusega varustamine kütmissviisi järgi, 2010 [4].

Kütteviis	Eluruumid [%]
Kaugkeskküte	61,8
Kohalik keskküte	8,1
Statsionaarselt paigaldatud elektriküte	4,3
Elektriküte teisaldatavate elektriseadmetega	3,7
Ahjud, pliidad, kaminad	30,4
Soojuspumbad	3,3
Põrandaküte (elekter)	15,3

Valgustuse osakaal kodutarbijate kogutarbimises kasvab Suurbritannias talvel 28%-ni [9]. Magistritöös [7] hinnatakse, et valgustuse osakaal võib Eestis kodutarbijate talvises energiatarbes väiksem olla, sest tõenäoliselt on kütte osakaal suurem kui Suurbritannias. Lähtudes asjaolust, et Eesti aasta keskmine valgustuse osakaal on 15% [14] ning arvestades, et kodumajapidamiste keskmine tarbimine aastas on 3465 kWh [4], siis valgustuse keskmine aastane tarbimine oleks 1,42 kWh päevas. Talvise ja suvise valgustuse energiatarbe eristamiseks esitati töös [7] järgnev analüüs: „Kui võrrelda suve ja talve, siis suvisel pööripäeval on pimedat aega ligikaudu 6 h ja talvisel pööripäeval 18 h [18]. Kui suvel on pime aeg öösel, siis talvel läheb valgeks umbes kell 8...9 ja pimedaks kella 16...17 ajal õhtul, seega on päevas tunde, kus tuleb valgustust kasutada tunduvalt rohkem - suvel ligikaudu 2...3 h ja talvel ligikaudu 9...10 h. Lisaks on talvel ka päeval valgustust rohkem sees. Kui arvestada ainult tundide erinevust siis tuleks suve ja talve valgustuse kasutusaja vahe 3...4 kordne ning kui juurde arvestada, et ka päeval nn. valgus ajal võib talvel rohkem valgustust sees olla, siis võib hinnata suve ja talve valgustuse energiakulu vahe ligi nelja kordseks“. Lähtudes neljakordsest

erinevusest ja suvisest valgustuse energiatarbest 0,84 kWh päevas, oleks keskmise talvapäeva valgustuse energiatarve 3,36 kWh.

Eelnevalt esitatud elektrikütte ning valgustuse energiatarbeid arvesse võttes koostati tabel 2.4, kus elektriseadmete keskmised tarbimised on enamasti võetud kirjandusest või saadud analüüsi tulemusena. Tabelis esitatud arvutuslikud kodutarbija tarbimised on saadud elektriseadme keskmise tarbimise ning varustatuse osatähtsuse korrutamisel ning osakaal on arvutatud kodutarbija arvutusliku kogutarbimise suhtes.

Tabel 2.4. Kodutarbija koormusklassi talvine koormuskoosseis [7].

Seade	Seadme keskmine tarbimine [kWh/päev]	Kodutarbija arvutuslik tarbimine [kWh/päev]	Osakaal kodutarbija kogutarbimisest [%]
Elektripliit	1,33	0,96	5,63
Elektriahi	0,74	0,14	0,82
Mikrolaineahi	0,23	0,14	0,82
Külmkapp	0,82	0,81	4,76
Sügavkülmik	1,90	0,30	1,76
TV	0,91	1,02	5,98
Pesumasin	0,80	0,71	4,16
Kuivati	0,78	0,01	0,06
Nõudepesumasin	1,72	0,26	1,53
Tolmuimeja	0,15	0,14	0,82
Õhukonditsioneer	2,976	0,15	0,90
Miniköök	1,092	0,04	0,24
Arvuti/ sülearvuti	0,60	0,43	2,53
Õhupuhasti/ ventilaator	0,60	0,36	2,11
Muusikakeskus/ raadio	0,30	0,22	2,34
Laadijad	0,20	0,09	0,98
DVD-mängija	0,40	0,17	1,79
Boiler	6,48	2,40	13,16
Elektrikeris	3,43 ²	0,14	1,47
Kohvimasin	0,13	0,03	0,30
Valgustus	3,36	[9], [14]	19,91
Soojuspump	26,4		5,06
Elektriküte sisse-ehitatud	66,00 ³		15,58
Elektriradiaatorid	13,00 ⁴	[3]	2,64
Põrandaküte	5,52	[16]	4,64

² Elektrikerise keskmise koormuse arvutamisel arvestati, et keskmine keris on võimsusega 6 kW ja seda kasutatakse keskmiselt kord nädalas 4 h. [7]

³ Eeldati, et keskmisel majapidamisel kulub sama ruumi elektriga kütmiseks 2,5 korda enam energiat kui kütmiseks soojuspumbaga. [7]

⁴ Eeldades, et keskmine elektriradiaator on 1 kW ning töötab täisvõimsusel 13 h ööpäevas. [7]

2.2 Põllumajandus

Põllumajanduse koormusklassi analüüsi aluseks on aruanne [20], milles on kirjeldatud Suurbritannia põllumajanduse energiatarvet ning koormuskoosseise erinevate põllumajanduslike tegevusalade lõikes. Eesti põllumajanduse struktuuri arvestamiseks tuvastati erinevate põllukultuuride kasvupinnad lähtudes Statistikaameti andmetest ning looma- ja linnukasvatuse põhinäitajad. Eesti põllumajanduse põhinäitajaid, mida kasutati analüüsiks on käsitletud tabelites 2.5 ja 2.6. Tabelites esitatud arvutuslik elektrienergia tarbimine tugineb allikas [20] esitatud energiatarvetele ning Eesti põllumajanduse põhinäitajatele.

Tabel 2.5. Taimekasvatuse põhinäitajad ja arvutuslik aastane elektrienergia tarbimine.

Põllukultuur	Kasvupind [ha]	Arvutuslik elektrienergia tarbimine [GWh/aasta]
Nisu	169700 [21]	52,69
Oder	131400 [21]	29,50
Rukis	14300 [21]	2,20
Kaer	35000 [22]	7,89
Kartul	5800 [21]	12,20
Sibul	202 [22]	1,01
Katmikalal kasvavad kultuurid		
Kurk	66 [22]	8,58
Tomat	146 [22]	18,98
Muu köögivili	23 [22]	2,99
Lilled katmikalal	9,5 [23]	2,76
Kokku		138,80

Tabel 2.6. Looma- ja linnukasvatuse põhinäitajad ning arvutuslik aastane elektritarve.

	Arv [tuh]	Arvutuslik elektrienergia tarbimine [GWh/aasta]
Piimalehmad	90,6 [24]	41,22
Kuldid ja emised	24,6 [24]	17,25
Broilerid	1206,087 [25]	0,40
Munade aastatoodang	20439,6 [26]	4,60
Kokku		63,47

Tabelites 2.5 ja 2.6 esitatud arvutuslike elektrienergia tarbimiste summa on 202,28 GWh. Võrdluseks, Eesti Statistikaameti andmetel [27] oli 2015. aastal põllumajandussektori tarbimine 206 GWh. Kui eeldada aruandele [20] sarnaseid põllumajanduslike tegevuste koormuskoosseise ning eeldada sagedusmuunduriga ühendatud mootorite osakaalu 20% sarnaselt [9] ja tuginedes allikale [28], siis on võimalik tuvastada tabelis 2.7 esitatud põllumajanduse koormusstruktuur.

Tabel 2.7. Eesti põllumajanduse koormusklassi arvutuslik koormuskoosseis.

Koormuskomponent	Osakaal [%]
Jahutusseadmed	9,61
Pumbad	6,90
Tööstusmootorid	6,43
Ventilatsioon	38,42
Sagedusmuunduriga mootorid	15,34
Valgustus	10,08
Elektriküte	13,22

2.3 Äri- ja avalik teenindus

Eesti äri- ja avaliku teeninduse sektori koormuskoosseise on varasemalt kirjeldatud Eleringi toimetises [3], kus valimiks on 3 hoonet: 2 kontorihoonet ja 1 kaubanduskeskus. Eeldades, et tüüpiliste kontorihoonete ning kaubanduskeskuste koormuskoosseisud vastavad toimetises käsitletud koormuskoosseisudele on võimalik määratleda 92% äri- ja avaliku teeninduse koormusklassi koormustest. Lisaks kontorihoonetele ning kaubanduskeskustele on toimetise [3] põhjal äri- ja avaliku teeninduse sektori koosseisus ka 8% muud tarbimist. Eeldades, et sellest veerand, 2% kasutatakse välisvalgustuseks ning ülejäänud koormus (6%) jaguneb sarnaselt eelnevalt määratletud 94% suurusele põhiosale, on võimalik saada tabeli 2.8 tulbas „Osakaal [%] [3], modifitseeritud“ esitatud äri- ja avaliku teeninduse koormuskoosseis.

Tabel 2.8. Äri- ja avaliku teenindus koormusklassi arvutuslik koormuskoosseis.

Koormuskomponent	Osakaal [%] [3], modifitseeritud	Osakaal [%] [19]	Keskmine [%]	Osakaal muu koormuse nullimise järel [%]
Bürooseadmed	3,41	5,85	4,63	4,93
Elektriküte ja vee soojendamise	14,76	19,22	16,99	18,09
Kompressorid	8,20	8,57	8,38	8,93
Köögiseadmed	0,835	5,19	3,01	3,21
Muu	4,52	7,66	6,09	0
Pumbad	0,00	5,84	2,92	3,11
Serverid	15,83	0	7,91	8,43
Sisevalgustus	26,34	20,78	23,56	25,09
Tsirkulatsiooni pumbad	0,00	6,88	3,44	3,66
Ventilatsioon	21,11	12,47	16,79	17,88
Välisvalgustus	5,00	4,68	4,84	5,15
Õhukonditsioneerid	0,00	2,86	1,43	1,52

Tulenevalt toimetise [3] väiksest valimist, 3 hoonet, on käesolevas aruandes valimi suurendamiseks täiendavalt kasutatud Euroopa Komisjoni väljaannet [19], milles esitatud koormuskoosseis on lisatud tabelisse 2.8 veergu „Osakaal [%] [19]“. Keskmistades toimetise [3] ning väljaande [19] koosseise, tuvastati veerus „Keskmine [%]“ esitatud koormuskoosseis. Keskmistatud koormuskoosseisu hulgas on määratlemata koormuskomponent „Muu“, mille modellemiseks on mitmeid võimalusi. Käesoleval juhul kasutati selle komponendi modellemiseks eeldust, et see käitub sarnaselt ülejäänud äri- ja avaliku teeninduse koormusklassi kuuluvate koormuskomponentidega ehk muu osakaal nulliti ning ülejäänud osakaalud jagati läbi 93,91%. Jagamise tulemused on esitatud tabeli tulbas „Osakaal muu koormuse nullimise järel [%]“.

2.4 Tööstus

Tööstuskoormust ühe puidutööstusettevõtte näitel on käsitletud doktoritöös [28], allikas esitatud koormuskomponentide osakaalud on esitatud tabeli 2.9 veerus „Osakaal [%] [28]“. Valimi suurendamiseks edastati küsitlusankeet kahele tööstusettevõttele ning ühe ettevõtte peaenergeetikult saadi vastus, mis on esitatud tabeli 2.9 veerus „Osakaal küsitluse vastustes [%]“. Peaenergeetiku vastustest ei selgunud sagedusmuunduriga ühendatud mootorite osakaalu, mille määramisel lähtuti allikas [29] esitatud hinnangust kasutati sarnaselt doktoritööle [9] kasutati osakaaluna 20% kogu mootorite koormusest. Kasutatud väärtus on lähedane doktoritöös [28] esitatud sagedusmuundurite osakaalule 15,8%. Kahe tööstusettevõtte osakaalude keskmistamise ning „Muu“ koormuse nullimise järel tuvastati koormuskomponentide osakaaludena tabeli 2.9 veerus „Osakaal muu koormuse nullimise järel [%]“ esitatud osakaalud.

Tabel 2.9. Tööstuse koormusklassi koormuskoosseis.

Koormuskomponent	Osakaal [%] [28]	Osakaal küsitluse vastustes [%]	Keskmine [%]	Osakaal muu koormuse nullimise järel [%]
Õhukonditsioneerid	1,5		0,75	0,83
Elektroonika	0,5		0,25	0,28
Valgustus	2	20	11	12,22
Elektriküte	1		0,5	0,56
Asünkroonmootorid				
otseühendusega	80	48	64	71,11
sagedusmuunduriga	15	12*	13,5	15,00
Muu		20	10	0

* - Sagedusmuunduriga mootorite osakaalu määramisel on lähtutud doktoritöös [9] kasutatud 20% reeglist, mis on kooskõlas allikas [29] esitatud osakaalu hinnanguga.

2.5 Elektriijaamade omatarve

Narva Elektriijaamade omatarvet on käsitletud uurimistöös aruandes [30] ning soojus-elektriijaamade omatarvet konspektis [31]. Uurimistöös aruandes [30] esitati Narva Elektriijaamade omatarbe koormuskoosseisuna tabeli 2.10 veerus „Osakaal Narva Elektriijaamade omatarbes [%] [30]“ asuvad väärtused. Väiksemate koostootmisjaamade omatarbe koormuskoosseisu osas eeldati, et koormuskomponentide koosseis sarnaneb üldiselt Narva Elektriijaamadele, kuid 20% mootoritest on ühendatud sagedusmuundurit kasutades. 20% osakaalu eeldus põhineb sarnaselt tööstuskoormusele allikas [29] esitatud hinnangule. Konspektis [30] on koormuskoosseisude osas käsitletud söe- ja gaasielektriijaamu. Söejaamade koormuskoosseisudes on kütuse ettevalmistusel suurem osakaal kui Narva Elektriijaamal ning väiksem pumpade ning ventilaatorite osakaal. Gaasijaamadel puudub kütuse ettevalmistus ning omatarve moodustavad erinevad pumpad ning ventilaatorid.

Tabel 2.10. Elektriijaamade omatarbe koormuskoosseis.

Koormuskomponent	Osakaal Narva Elektriijaamade omatarbes [%] [30]	Osakaal koostootmisjaama omatarbes [%]
Elektrifiltrid	1,50	1,50
Hüdrotuhaärastus	13,48	10,78
Kompressorid	1,50	1,20
Kondensaadipumbad	2,53	2,03
Kütuse etteanne	3,11	2,49
Kütuse ettevalmistus	9,45	7,56
Suitsuimejad	18,32	14,65
Toitepumbad	33,63	26,92
Tsirkulatsioonipumbad	3,92	3,13
Ventilaatorid	12,56	10,04
Sagedusmuunduriga mootorid	0	19,70

2.6 Kokkuvõte

Projekti II etapi aruandes [2] kasutati koormuskoosseisude analüüsil nelja koormusklassi: kodutarbijad, põllumajandus, äri- ja avalik teenindus, tööstus. Käesolevas aruandes lisati viies koormusklass, elektriijaamade omatarve, mille koosseisus eristatakse suurte (>100 MW) soojuselektriijaamade omatarvet ning väiksemate koostootmisjaamade omatarvet. Kodutarbijate koormusklassi osas esitati eraldi suvine ning talvine koormuskoosseis. Põllumajanduse, äri- ja avaliku teeninduse ning tööstuse koormusklassi puhul ei eristata alamklasse ega hooajalisi erinevusi tulenevalt lähteandmete puudusest.

Eelnevalt esitatud koormusklasside koormuskoosseisude määratlemisel kasutati arvukalt eeldusi, seetõttu tuleks esitatud andmetesse suhtuda kriitiliselt ning võimalusel eelistada otseste mõõtmiste või küsitlustega kogutud andmeid.

2.7 Kasutatud kirjandus

- [1] Treufeldt, Ü., Leinakse, M., Salumäe, U., Sarnet, T., Meldorf, M. Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud. Projekti I etapi aruanne. TTÜ elektroenergeetika instituut, 2015, 305 lk.
- [2] Treufeldt, Ü., Meldorf, M., Leinakse, M., Sarnet, T., Salumäe, U. Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud. Projekti II etapi lõpparuanne. TTÜ elektroenergeetika instituut, 2016, 180 lk.
- [3] Rosin, A., Drovtar, I., Link, S., Hõimoja, H., Mölder, H., Möller, T. Tarbimise juhtimine: suurtarbijate koormusgraafikute salvestamine ning analüüs tarbimise juhtimise rakendamise võimaluste tuvastamiseks. Eleringi toimetised nr 3/2014 (8). Elering, 2014, 57 lk.
- [4] Eesti Statistikaamet. 2012 Leibkondade energia tarbimiseuuring. Lõppraport. Tallinn, 2013, 29 lk.
- [5] Rosin, A., Möller, T., Lehtla, M., Hõimoja, M. Analysis of household electricity consumption patterns and economy of water heating shifting and saving bulbs. Power and Electrical Engineering, Scientific Journal of Riga Technical University, Vol. 27, 2010, pp. 15-20.
- [6] Vill, K. Tarbimise juhtimise mõju elektri kvaliteedile kortermajas. Magistritöö. TTÜ elektrotehnika instituut, 2015, 83 lk.
- [7] Karin, E. Kodutarbijate tüüpkoormusseadmete pingekarakteristikute modelleerimine tarkvaraga PSCAD. Magistritöö. TTÜ elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut, 2017, 101 lk.
- [8] Sorts, S. Eesti elektrisüsteemi põhivõrgu sõlmekoormuste sagedussõltuvuste uurimine. Magistritöö. TTÜ elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut, 2017, 98 lk.
- [9] Cresswell, C. Steady State Load Models for Power System Analysis. PhD thesis. Edinburgh: The University of Edinburgh, 2009, 312 pp.

- [10] Ballanti, A., Ochoa, L. F. Initial Assessment of Voltage-Led Demand Response from UK Residential Loads. 2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), Washington, DC, February 2015, pp. 1-5.
- [11] Runming, Y., Koen, S. A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK. *Energy and Buildings*, Vol 37, No 6, June 2005, pp. 663-671.
- [12] Bokhari, A., Alkan, A., Dogan, R., Diaz-Aguilo, M., Leon, F., Czarkowski, D., Zabar, Z., Birenbaum, L., Noel, A., Uosef, R.E. Experimental Determination of the ZIP Coefficients for Modern Residential, Commercial, and Industrial Loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol 29, No 3, 2014, pp. 1372-1381.
- [13] Firth, S., Lomas, K., Wright, A., Wall, R. Identifying trends in the use of domestic appliances from household electricity consumption measurements. *Energy and Buildings*, Vol 40, No 5, 2008, pp. 926-936.
- [14] Raesaar, P. Energiasääst kodumajapidamises, 2009. http://kesa.edu.ee/pdf/energiasaast_kodumajapidamises.pdf (14.09.2016)
- [15] K-Rauta. Saunakerised. <https://www.k-rauta.ee/ehituspood/kerised> (28.09.2016)
- [16] Rosin, A. Elektrienergia säästlik kasutamine ja kulutõhus juhtimine, 2012. http://www.teaduspark.ee/UserFiles/Projektid/empower/Energia_Rosin_TartuTeaduspark_21nov12_Ver7.pdf (22.09.2016)
- [17] Rõigas, S. Äri ja avaliku teeninduse sektori koormuste modelleerimine tarkvaras PSCAD. Bakalaureusetöö. TTÜ elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut, Ilmumas.
- [18] Eesti Entsüklopeedia. Eesti kliima. http://entsyklopeedia.ee/artikkel/eesti_kliima (10.10.2016)
- [19] Bertoldi, P., Hirl, B., Labanca, N. Energy efficiency status report 2012. Electricity Consumption and Efficiency Trends in the EU-27. Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2012, 143 pp.
- [20] Warwick HRI. AC0401: Direct energy use in agriculture: opportunities for reducing fossil fuel inputs. Final report to Defra. Warwick HRI, 2007, 57 pp.
- [21] Eesti Statistika. Mullu saadi rekordiline teraviljasaak. <https://www.stat.ee/pressiteade-2016-011> (15.02.2017)
- [22] Eesti Statistikaamet. PM031: Põllukultuuride kasvupind 2016. (15.02.2017)

- [23] Eesti Statistikaamet. Eesti lillekasvatus. <https://statistikaamet.wordpress.com/tag/eesti-lillekasvatus/> (15.02.2017)
- [24] Eurostat. Animal populations (December) by NUTS 2 regions [agr_r_animal]. Last Update 19.04.17.
- [25] Eesti Statistikaamet. PMS013: Linnukasvatus --- Aasta, Näitaja, Valdaja õiguslik vorm ning Linnud. (15.02.2017)
- [26] Eesti Statistikaamet. Munatarbimine suureneb. <https://statistikaamet.wordpress.com/2017/04/11/munatarbimine-suureneb/> (16.04.2017)
- [27] Eesti Statistikaamet. KE061: Kütuse tarbimine (15.02.2017)
- [28] Drovtar, I. Tarbimise juhtimise võimaluste uurimine ning rakendatavus pinge reguleerimise teenusteks. Doktoritöö. TTÜ Kirjastus, 2016, 164 lk.
- [29] Bartos, F.J. ABB hosts technology day in Sweden. Control Engineering, Vol 51, No 12, December 2004, pp 16.
- [30] Tammoja, H., Valdma, M., Keel, M., Terno, O., Šuvalova, J. Eesti elektriyaamade juhitavuse ja talitluskindluse modelleerimine energiasüsteemi tasandil ning elektriyaamade seadmete karakteristikute määramine. Teadusliku uurimistöö aruanne (Leping 5010L). Tallinn, 2016, 75 lk.
- [31] Tammoja, H. Elektriyaamad. Konspekt. TTÜ elektroenergeetika instituut, 2012, 100 lk.

3 Staatiliste pingekarakteristikute määramise meetoodika

Komponendipõhise koormuskarakteristikute koostamise meetoodika rakendamisel on tarvis üksikute koormuskomponentide mudelid (ehk karakteristikud) summeerida, et tuvastada koormusklasside mudelid. Samuti on tarvis koormusklasside mudeleid summeerida lähtuvalt nende osakaaludest, et tuvastada koormussõlmede koormuskarakteristikud. Koormuskomponentide summerimise meetoodikat käsitletakse alapeatükis 3.1. Summeeritud pingekarakteristikute teisendamist modelleerimiseks sobilikule kujule, kas PSCAD või PSSE tarkvaras rakendamiseks sobilikule kujule, käsitletakse alapeatükis 3.2. Alapeatükis 3.3 analüüsitakse koormuskomponentide pingekarakteristikuid ning tuvastatakse nende summeerimisel lähtudes peatükis 2 esitatud osakaaludest koormusklasside staatilised pingekarakteristikud.

3.1 Koormuskomponentide summeerimine

Komponendipõhise koormusmudeli koostamise meetoodika rakendamisel lähtutakse sõlmekoormuse koormuskarakteristikute määramisel koormuskomponentide osakaaludest ning nende mudelitest. Käesolevas alapeatükis käsitletakse laialdaselt kasutatava eksponentsiaalse koormusmudeli ja polünoommudeli summeerimist ning teisendamist. Kirjeldatud meetoodikat saab kasutada koormuskomponentide staatiliste pingekarakteristikute summeerimiseks, näiteks koormusklassi mudeli parameetrite arvutamiseks lähtudes koormuskomponentide osakaaludest ning pingekarakteristikutest. Sageduskarakteristikute summeerimist käsitletakse peatükis 5.

*Reaktiivvõimsuse koormusmudeli tegurite summana kasutatakse kirjanduses kohati ka teisi väärtusi. Ühe sageli esineva versiooni puhul on induktiivse koormuse korral summaks +1, mahtuvusliku koormuse korral -1 ning takistusliku koormuse korral 0. Teine levinud lahendus on reaktiivvõimsuse tegurite summana $\tan(\varphi)$ väärtuse kasutamine. Käesolevas aruandes kasutatakse võimsusteguri jaoks eraldi muutujat ning seetõttu on parameetrite summana kasutusel väärtus +1.

Kahe eelnevalt kirjeldatud mudeli, eksponentmudeli ning polünoommudeli summeerimise võimaluste analüüsiks on võimalik analüüsida kahe mudeli kombineerimisel tekkivat koormusmudelit, mille võrrandid on:

Selles mudelis on eksponentmudelite osakaaludeks ja , mis moodustavad polünoommudeli osakaalust ülejääva osa, vastavalt $E_{P_{load}} = (1 - Y_{P_{load}} - I_{P_{load}} - P_{load})$ ja $E_{Q_{load}} = (1 - Y_{Q_{load}} - I_{Q_{load}} - Q_{load})$. Täielikult eksponentsiaalse aktiivkoormuse korral on $Y_{P_{load}} = I_{P_{load}} = P_{load} = 0$ ehk $E_{P_{load}} = (1 - Y_{P_{load}} - I_{P_{load}} - P_{load}) = 1$, polünoommudeli korral on $E_{P_{load}} = (Y_{P_{load}} - I_{P_{load}} - P_{load}) = 0$. Järelikult eelnevalt kirjeldatud mudeliga saab kirjeldada nii koormuse eksponentsiaalsed pingekarakteristikud kui ka polünoommudelit.

Samuti on valemities esindatud koormuse lineaarne sagedustundlikkus $P = P_0(1 + K_{pf}\Delta f)$ ja $Q = K_s Q_0(1 + K_{qf}\Delta f)$, mis on kasutusel nii eksponentmudelis kui ka polünoommudelis. Reaktiivvõimsuse valemisse on lisatud tegur , mis iseloomustab reaktiivvõimsuse suunda.

3.1.1 Koormuskomponentide reaktiivvõimsuste osakaalud ja summaarse koormuse võimsustegur

Kui summaarne koormus nimipinge ja nimisageduse korral on $S_0 = P_0 + jK_s Q_0$ ning koormuskomponente on N , siis igale koormuskomponentile i vastav aktiivkoormus P_{i0} ja reaktiivkoormus $K_{is} Q_{i0}$ avalduvad võrranditega:

Eeldades, et koormuskomponenti i võimsustegur on $PF_i = \cos(\varphi_i)$, saab koormuskomponenti i reaktiivkoormuse avaldada võrrandiga:

3.1.2 N koormuskomponendi tarbitav summaarne võimsus

3.1.3 N koormuskomponendi summaarsed pingekarakteristikud

Astendajate $K_{\Sigma pu}$ ja $K_{\Sigma qu}$ väärtuste tuvastamiseks on otstarbekas kasutada eksponentsiaalsete karakteristikute numbrilist summeerimist ning eksponentmudeliga lähendamist. Lähtuvalt PSCAD mudeli omadustest, võib arvutusvahemikuna kasutada pingeid $U_j/U_0 \in \{0,8\dots 1,2\}$, kus pingete indeksid on vahemikus $j\dots n$, ning sihifunktsioone:

3.2 Staatiliste pingekarakteristikute teisendamine

Lähtuvalt koormuskomponentide mudelite summeerimiseks kasutatud koormusmudelid, mis ei vasta kasutatavate võrguarvutustarkvarade koormusmudelitele on tarvilik koormusmudeli parameetrite teisendamine.

3.2.1 PSSE ja PSCAD staatilised koormusmudelid

PSCAD koormusmudel Fixed Load

PSCAD eksponentsiaalse koormusmudeli pingekarakteristikuid kirjeldavad pingevahemikus

võrrandid:

$$P = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{K_{pu}} \quad (3.32)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{K_{qu}} \quad (3.33)$$

kus:

, , – vastavalt koormuse nimipinge ning aktiiv- ja reaktiivkoormus koormuse nimipinge ja nimisageduse korral;

– pinge;

K_{pu} , – vastavalt aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkuse tegurid.

PSS/E staatiline koormusmudel Load

PSS/E staatilise koormusmudeli parameetrite sisestamiseks on võimalik kasutada järgneval joonisel esitatud kasutajaliidest. Koormusmudeli pingetundlikkuse seisukohalt on olulised parameetrid Y_{Pload} , I_{Pload} , P_{load} , Y_{Qload} , I_{Qload} ja Q_{load} , mille mõju aktiiv- ja reaktiivkoormusele kirjeldavad valemid 3.36 ja 3.37.

Basic Data	
Bus Number	Bus Name
1	BUS1 110,00
Load ID	
1	<input checked="" type="checkbox"/> In Service <input checked="" type="checkbox"/> Scalable <input type="checkbox"/> Interruptible

Load Data	
Pload (MW)	Qload (Mvar)
0.0000	0.0000
IPload (MW)	IQload (Mvar)
0.0000	0.0000
YPload (MW)	YQload (Mvar)
0.0000	0.0000

Grouping Data		
Area	1	Select ...
Owner	1	Select ...
Zone	1	Select ...

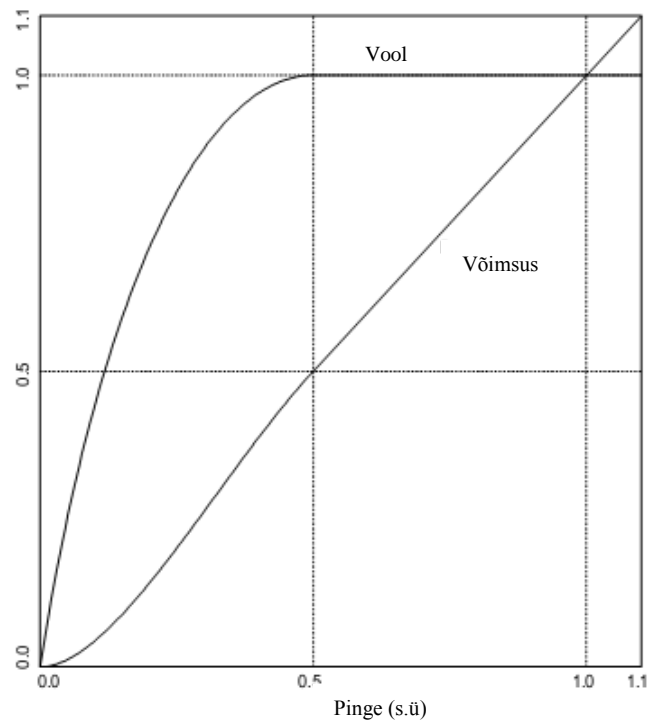
Joonis 3.1. PSS/E mudeli Load seadistusaken [1].

nimipinge ja nimisageduse korral.

Seost mudeli valemitega 3.36 ja 3.37 kirjeldatud PSS/E staatilise mudeli parameetrite ning mudeli parameetrite teisendamisel kasutatavate suuruste vahel kirjeldab järgnev tabel.

Tabel 3.1. Staatilise koormusmudeli parameetrite vastavus

Pingetel alla 0,5 s.ü kasutab PSS/E püsivooluga koormuskomponendi konstantse voolu asemel nullpunktiga ühendatud elliptilist kõverat. Joonisel 3.2 on ülemisel graafikul kirjeldatud konstantse voolutugevusega koormuskomponendi voolutugevuse ning alumisel graafikul aktiiv- ja reaktiivvõimsuse sõltuvus pingest.



Joonis 3.2. PSS/E konstantse voolutugevusega koormuskomponendi graafikud [11].

Konstantse võimsusega mudeli piirtingimused on seatavad muutujaga *PQBRAK*. *PQBRAK* sätestab pinge väärtuse, millest väiksematel pinge väärtustel väheneb voolutugevus pinge vähenemisel elliptiliselt nullväärtuseni, sarnaselt püsivooluga koormuskomponendi kõverale. Selline piirtingimuste seadmine on vajalik, et koormust kirjeldada pinge funktsioonina kogu pinge määramispiirkonnas. Püsivõimsusega koormusmudeli graafikud on toodud joonisel 3.3. Joonisel on ülemisel graafikul kirjeldatud konstantse võimsusega koormuskomponendi aktiiv- ja reaktiivvõimsuse ning alumisel graafikul voolutugevuse sõltuvus pingest. Kuna vool on kirjeldatud elliptilise kõveraga, väheneb ka võimsuse väärtus alates *PQBRAK* väärtusest nullini vastavalt voolutugevuse muutusele.

3.2.2 Koormusmudeli parameetrite teisendamise meetodid

Koormusmudelite teisendamiseks on võimalik kasutada mudelite numbrilist lähendamist. Järgnevas analüüsis on esitatud ainult aktiivvõimsuse mudelite parameetrite teisendused, sest reaktiivvõimsuse mudelite parameetrite teisendused saab teostada analoogselt. Eeldades, et on teada parameetrid x_1 ja otsitavateks parameetriteks on x_2 ning huvipakkuvaks pingevahemikuks on $U_j/U_0 \in \{0,8\dots1,2\}$, kus $j \in \{1;2\dots n\}$, siis võib teisendamiseks kasutatava optimeerimisprobleemi koostada lähtuvalt järgnevalt esitatud üldkujust:

Koormusmodelite võrrandite ning parameetrite valik sõltub tehtavast teisendusest, järgnevalt on käsitletud peamiste teisenduste teostamiseks sobilikke lahendusi.

EkspONENTMUDELI POLÜNOOMMUDELIKS TEISENDAMINE

EkspONENTMUDEL JA POLÜNOOMMUDEL ON KIRJELDATAVAD VÕRRANDITEGA:

Summeerimisel kasutatud mudeli teisendamine polünoommudeliks

Summeerimisel kasutatud mudeli ja polünoommudeli võrrandid on:

Summeerimisel kasutatud mudeli teisendamine eksponentmudeliks

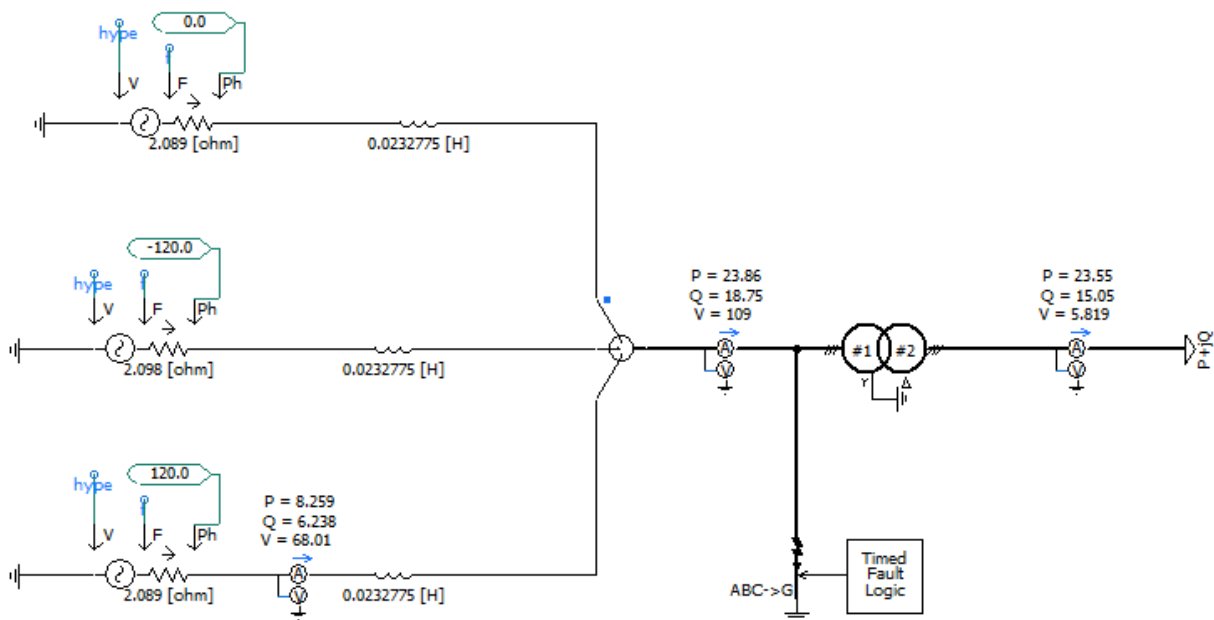
Summeerimisel kasutatud mudel ja eksponentmudel on kirjeldatavad võrranditega:

Optimeerimisprobleemide numbrilise lahendamise võimalused

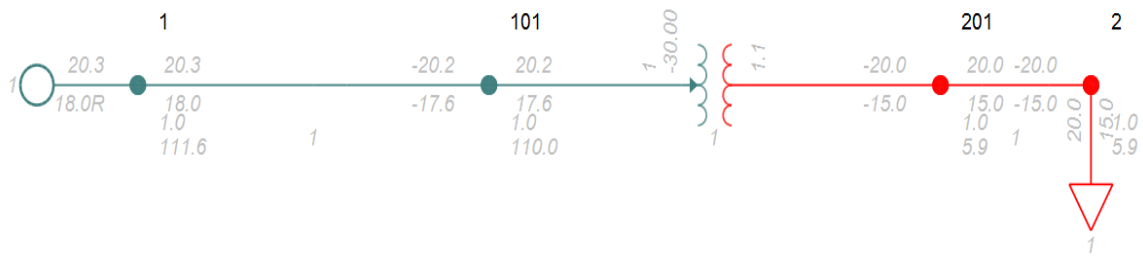
Koostatud optimeerimisprobleemide lahendamiseks on võimalik kasutada numbrilisi meetodeid. Sobilikud algoritmid on saadaval näiteks MATLAB tarkvara funktsioonides *lsqcurvefit* (Curve Fitting Toolbox) [4] ja *fmincon* (Optimization Toolbox) [5]. Alternatiivselt on võimalik kasutada MATLABi vabavaralises optimeerimisfunktsioonide kogumis OPTI Toolbox [6] leiduvat algoritmi *NL2SOL* [7]. Samuti on optimeerimisprobleemi võimalik lahendada SciLab funktsiooniga *leastsq* [8]. Pythoni kasutamisel on vähemruutude meetod olemas nt SciPy funktsioonina *scipy.optimize.curve_fit* [9].

3.2.3 Teisendustäpsus võrdleva modelleerimise põhjal

Bakalaureusetöös [3] analüüsiti PSCAD ja PSS/E koormusmodeli parameetrite teisendamist lähtudes eelnevalt kirjeldatud numbrilistest meetoditest. PSCAD mudelina kasutati joonisel 3.6 kujutatud skeemi, mida on detailsemalt kirjeldatud aruandes [1]. Kuna PSS/E arvutab võimsust pärijärgnevuskomponentide abil, kuid PSCAD leiab suuruseid hetkväärtuste põhiselt, arvestades ka vastu- ja nulljärgnevuskomponente, mõõdeti PSCAD-is pärijärgnevuspinget ja voolu [3]. PSS/E-s koostati PSCAD-i mudelile ekvivalentne võrgu aseskeem, mis on esitatud joonisel 3.7.



Joonis 3.6. PSCAD võrgu aseskeem [3].



Joonis 3.7. PSS/E võrgu aseskeem [3].

Kasutati ideaalse generaatori mudelit. Generaatori sisetakistust modelleeriti generaatorit trafoga ühendava liini abil. Trafo seadistati samade parameetrite järgi nagu PSCAD-i mudelis, seadistusakent kujutab joonis 3.8.

Two Winding Transformer Data Record

Power Flow | Short Circuit

Line Data

From Bus Number: 101 | From Bus Name: 115.00 | In Service

To Bus Number: 201 | To Bus Name: 6.0000 | Metered on From end

Branch ID: 1 | Transformer Name: | Winding 1 on From end

Vector Group: | ...

I/O Data

Winding I/O Code: 3 - Turns ratio (pu on nom wind kV)

Impedance I/O Code: 3 - Load loss (W) & |Z| (pu)

Admittance I/O Code: 2 - No load loss & exc. I

Transformer Impedance Data

Load loss (W): 147840.000000 | Specified |Z| (pu): 0.103200

No load loss (W): 34880.000000 | Exciting I (pu): 0.002500

Impedance Table: 0

Load loss table corrected (W): 147840.000000 | |Z| table corrected (pu): 0.103200

Transformer Nominal Ratings Data

Winding 1 Ratio (pu): 1.0000 | Winding 1 Nominal kV: 115.0000 | Ratings (MVA): RATE1: 32.0, RATE2: 32.0, RATE3: 32.0, RATE4: 0.0

Winding 2 Ratio (pu): 1.0000 | Winding 2 Nominal kV: 6.6000

Winding (1-2) Angle (degrees): -30.00 | Winding MVA: 32.0000

Control Data

Controlled Bus Number: 0 | Controlled Bus Name: | Control Mode: 0- None

Controlled Bus On Winding Side

Auto Adjust

Tap Positions: 33 | Wnd Connect Angle: 0.000000

R1max (pu): 1.100000 | R1min (pu): 0.900000 | Load Drop Comp Load Drop Comp R (pu): 0.000000

Vmax (pu): 1.100000 | Vmin (pu): 0.900000 | Load Drop Comp X (pu): 0.000000

Owner Data

Owner: 1 | Fraction: 1.0000

Owner: 0 | Fraction: 1.0000

Owner: 0 | Fraction: 1.0000

Owner: 0 | Fraction: 1.0000

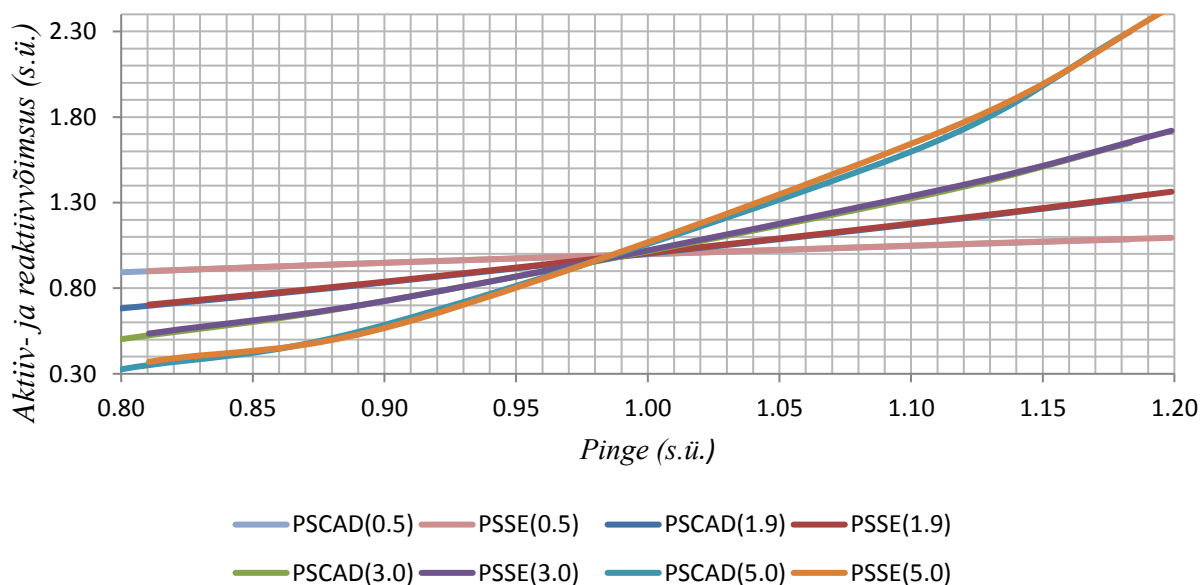
OK | Cancel

Joonis 3.8. Trafo mudeli seadistusaken [3]

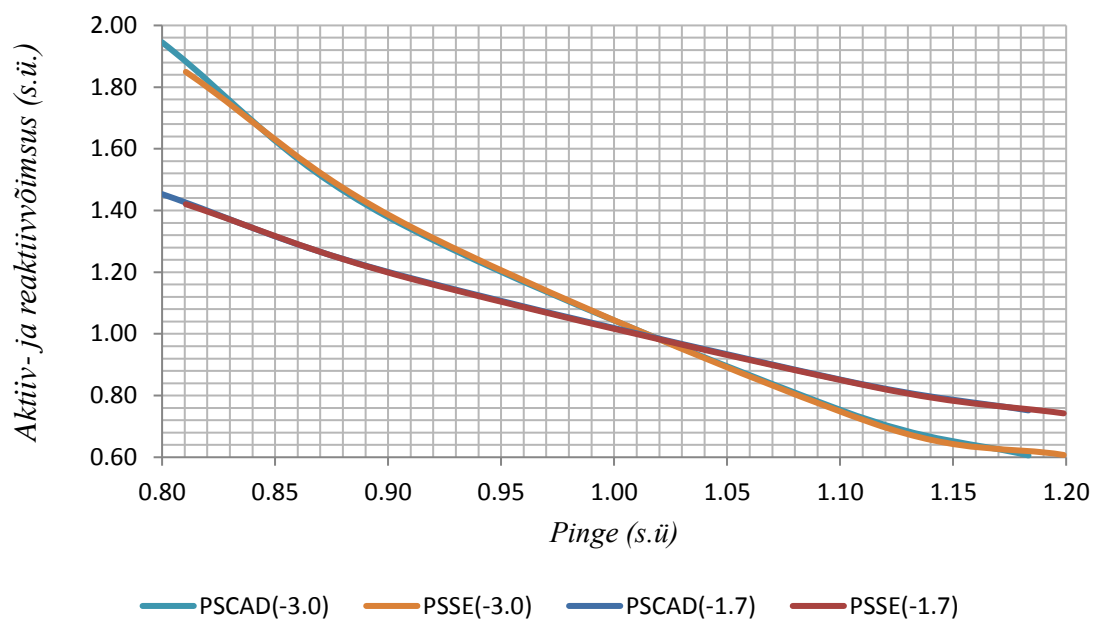
Pingehüppe modelleerimiseks teisendati PSS/E koormuse ja generaatori mudelid dünaamiliseks tegevusega *Convert/Restructure Loads and Generators*. Koormus sisestati staatilisse mudelisse esialgu konstantse võimsusena. Dünaamiliseks mudeliks teisendamisel sisestati osakaalud, mis vastasid eksponentmudelist teisendatud ZIP mudeli osakaaludele. Seejärel korrastati juhtivusmaatriks ja leiti lahendus lülitusoperatsioonidele.

PSS/E ja PSCAD koormusmudelite sarnasust hinnati koormuse aktiivvõimsus- ja reaktiivvõimsuskomponendi suhteliste erinevuste kaudu $\Delta P_{\%}$ ja $\Delta Q_{\%}$ [3]

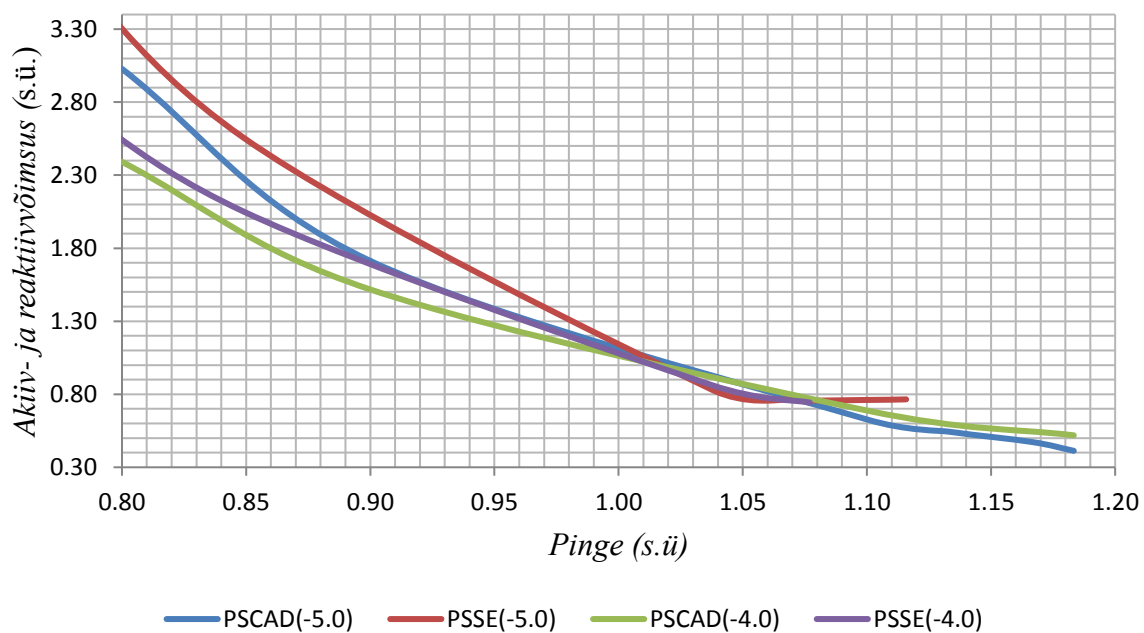
Simulatsioonide tulemusena tuvastati, et positiivsetel pingetundlikkustel (joonis 3.9) ning väiksematel negatiivsetel pingetundlikkusteguri väärtustel (joonis 3.10) on teisendamise viga väike, kuid suurematel negatiivsetel pingetundlikkusteguri väärtustel ilmsesid suuremad erinevused.



Joonis 3.9. PSCAD ja PSSE koormusmudeli pingekarakteristikud. PSSE ja PSCAD mudeli tähistusena kasutatud mudelile vastava eksponentmudeli pingetundlikkusteguri väärtusi K_{pu} ja K_{qu} . [3]



Joonis 3.10. PSCAD ja PSSE koormusmodeli pingekarakteristikud. PSSE ja PSCAD mudeli tähistusena kasutatud mudelile vastava eksponentmudeli pingetundlikkusteguri väärtusi K_{pu} ja K_{qu} . [3]



Joonis 3.11. PSCAD ja PSSE koormusmodeli pingekarakteristikud. PSSE ja PSCAD mudeli tähistusena kasutatud mudelile vastava eksponentmudeli pingetundlikkusteguri väärtusi K_{pu} ja K_{qu} . [3]

Tabelis 3.3 on esitatud teisenduse suhtelised vead erinevatel pingetundlikkusteguri väärtustel ja maksimaalne suhteline viga protsentides ning joonisel 3.12 on esitatud maksimaalse vea sõltuvus pingetundlikkustegurist.

Tabel 3.3. PSSE – PSCAD koormusmudeli parameetrite teisenduse suhteline võimsuse viga [%] [3].

3.3 Koormusklasside pingekarakteristikute tuletamine

Peatükis 2 kirjeldati koormusklasside koormuskoosseise lähtudes koormuskomponentidest ehk tüüpkoormusseadmetest. Käesolevas alapeatükis 3.3 analüüsitakse kasutatud komponentide staatilisi pingekarakteristikuid lähtudes kirjandusest. Tuginedes alapeatükis 3.1. esitatud komponentide summeerimise metoodikale tuvastatakse klasside pingekarakteristikud, mida võrreldakse kirjanduses esitatud koormusklasside pingekarakteristikutega. Koormusklasside pingekarakteristikute agregeerimisel tuvastatakse sõlmekoormuste pingekarakteristikud, mis teisendatakse alapeatükis 3.2 kirjeldatud teisenduste põhjal PSCAD ja PSSE tarkvaras rakendamiseks sobilikule kujule.

3.3.1 Koormuskomponentide pingetundlikkuse tegurid

Järgnevates tabelites on koormuse polünoommudeli (ZIP mudeli) parameetreid tähistatud lähtudes järgnevatest võrranditest, lisaks on kasutusel parameeter PF , mis kirjeldab koormuskomponendi võimsustegurit:

Aktiivtakistuslikud kütte ning köögiseadmed

Aktiivtakistuslikeks seadmeteks võib lugeda boilerit, elektriahju, elektrikerist, elektrikütet, elektripliiti, elektriradiaatorit, põrandakütet ning kohvimasinat. [16]

Tabel 3.4. Aktiivtakistuslike koormuskomponentide koormusmudel.

Elektroonika ja infotehnoloogia seadmed

Lähtuvalt toiteploki ehitusest on võimalik elektroonikat jagada kolmeks alamgrupiks: võimsusteguri korrektsoonita (no-PFC), passiivse võimsusteguri korrektsooniga (p-PFC) ning aktiivse võimsusteguri korrektsooniga (a-PFC) [16]. Euroopa Liidu elektromagnetilise ühilduvuse regulatsioonidest lähtuvalt peavad üle 75 W võimsusega seadmed sisaldama võimsustegurit korrigeerivat ahelat. Seetõttu võib alla 75 W võimsusega elektroonikaseadmete puhul eeldada võimsusteguri korrektsoonita (no-PFC) toiteploki. [16] [17]

Nimetatud kolmele ehitusele vastavad staatilised pingekarakteristikud on esitatud järgnevas tabelis. Esitatud väärtuste põhjal on kõigi kolme lahenduse aktiivvõimsuse pingetundlikkus lähedane konstantsele aktiivvõimsusele ning peamised erinevused on reaktiivvõimsuse karakteristikutes ning võimsustegurites. Tabelis 3.5 esitatud summaarsed pingekarakteristikud on leitud lähtudes alapunktis 3.2 kirjeldatud summeerimisvalemist, eeldades võrdset summeeritavate mudelite aktiivkoormuste osakaalu. Reaktiivkoormuse mudelite parameetrite K_{ZQ} , K_{IQ} ja K_{QQ} arvutamisel leiti esmalt summeeritavate mudelite reaktiivkoormuste suhe ning reaktiivkoormuste osakaalud summaarses reaktiivkoormuses korrutati summeerimisel vastavate mudelite parameetritega.

Tabel 3.5. Elektroonikaseadmete pingekarakteristikute sõltuvus toiteploki võimusteguri korrektsooniahela ehitusest.

Kodutarbijate arvutite, tööstuse elektroonika ning äri- ja avaliku teeninduse bürootehnika osas on pingekarakteristikute määramiseks tarvis teada täpsemat seadmete koosseisu. Kui lähtuda kirjandusallikatest [19] ja [20] ning eeldada tööstuses kasutatava elektroonika ning äri- ja avaliku teeninduse bürootehnika osas sarnast koosseisu, siis on võimalik kasutada järgnevas tabelis esitatud seadmete osakaale.

Tabel 3.6. Arvutustehnika seadmete osakaalud

Eelnevas tabelis esitatud seadmete osakaalude tõlgendamisel on võimalik kasutada järgnevalt esitatud analüüsi ning tulemusena koostada allolevas tabelis esitatud koormuskarakteristikute osakaalud. Lauaarvutite mõõtmisel tuvastati doktoritöös [16], et 85% analüüsitud lauaarvutitest kasutas p-PFC ning 15% a-PFC toiteplokki. Sülearvutite osas tuvastati 56% no-PFC, 19% p-PFC ja 25% a-PFC toiteplokkide osakaal. Samuti tuvastati, et printerid ning multifunktsionaalsed seadmed (printer-skänner-koopiamasin) on aktiivtakistusliku pingekarakteristikuga. Äri- ja avaliku teeninduse sektoris kasutatavate serverite puhul eeldati käesolevas projektis a-PFC toitelahendust lähtuvalt piiratud ruumist ning seadmete suurest võimsusest.

Tabel 3.7. Arvutustehnika koormuskomponentide koosseis

Kodutarbijate televiisorite mudelid on käsitletud doktoritöös [16], kus hinnati erinevat tüüpi toiteplokkide osakaaludeks: 13% no-PFC, 27% p-PFC ja 60% a-PFC. DVD-mängijate, digibokside, raadiote, laadijate ning teiste väikeseadmete puhul on eeldatud no-PFC toiteplokki. Lisaks kirjeldatud seadmetele saab elektroonilise koormusena käsitleda ka mikrolaineahje, mis töötavad p-PFC tüüpi koormusena [16].

Valgustus

Enamiku koormusklasside koormuskoosseisudes esineb valgustus, mille modelleerimiseks on tarvilik teada erinevate valgusallikate osakaale. Tööstuses kasutatavate valgusallikate osakaale on käsitletud aruandes [21], millele tuginedes eeldatakse, et 38% on kõrgrõhu-naatriumlampe ning 62% luminofoorlampe. Eeldades, et põllumajanduse ning tööstuse valgustusallikate osakaalud on sarnased, kasutati samu osakaale ka põllumajanduse koormusklassi valgustuskoormuse modelleerimiseks. Äri- ja avaliku teeninduse koormusklassi välisvalgustusena kasutati kõrgrõhu-

naatriumlampe lähtudes allikast [22] ning sisevalgustusena 70% luminofoorlampe ning 30% kompaktluminofoorlampe lähtuvalt aruandest [21]. Kodutarbijate valgusallikate koosseisuna kasutati 4,56% hõõglampe, 55,44% halogeenvalgusteid, 7,47% kompaktluminofoore ning 0,76% LED valgusteid lähtudes Suurbritannia 2015. aasta statistikast [19]. Järgnevasse tabelisse on koondatud mitmetes kirjandusallikates esitatud valgusallikate staatilised pingekarakteristikud ning lisatud aktiivkoormuste osakaalud sama tüüpi valgusallikate kaalutud keskmise karakteristiku arvutamiseks.

Tabel 3.8. Valgusallikate pingekarakteristikud

Eelnevas lõigus nimetatud valgusallika tüüpidele vastavate pingekarakteristikute määramiseks summeeriti sama valgusallika tüübiga pingekarakteristikud lähtudes tabelis esitatud aktiivkoormuse osakaaludest kasutades alapeatükis 3.1 kirjeldatud meetodikat. Reaktiivkoormuse tegurite summeerimisel arvutati esmalt mudelite reaktiivkoormuste osakaalud lähtudes võimsusteguritest ning aktiivkoormuste osakaaludest. LED valgustite puhul määrati suurem osakaal allikates esitatud üldistatud karakteristikutele ning vähendati üksikute mõõdetud valgusallikate karakteristikute mõju. Tulemusena saadi valgusallikate kaalutud keskmised pingekarakteristikud, mis on esitatud järgnevas tabelis.

Tabel 3.9. Valgusallikate summeeritud pingekarakteristikud

Ühefaasilise mootoriga koormuskomponendid

Ühefaasiliste mootorite puhul eristatakse mootoreid lähtudes ühendusviisist (otseühendusega või läbi sagedusmuunduri ühendatud), käivitusahelast (mahtvuslik või takistuslik käivitus), püsitalitlusest (induktiivse või mahtvusliku püsitalitlusega) ning mootori vastumomendist (püsivastumomendiga või kiirussõltuva vastumomendiga). Järgnevalt tähistatakse otseühendusega takistusliku käivitusega ja induktiivse püsitalitlusega ühefaasilist mootorit RSIR; otseühendusega mahtvusliku käivituse ja mahtvusliku püsitalitlusega ühefaasilist mootorit CSR; püsivastumomenti tähistatakse CT ning kiiruse ruutsõltuvusega vastumomenti QT. Peatükis 2 kirjeldatud koormuskomponentidest kuuluvad ühefaasilise mootoriga koormuse hulka pesumasinad, trummelkuivatid, nõudepesumasinad, külmkapid, jääkapid ning osa õhukonditsioneeridest, kompressoritest ning soojuspumpadest.

Pesumasin, kuivati ning nõudepesumasin on töötüklite põhjal peamiselt takistuslikud koormused, nende töötükli jaotus erinevateks komponentideks on esitatud järgnevas tabelis. Pesumasinade, trummelkuivatite ning pesumasin-kuivatite puhul on põhimootor CSR-CT tüüpi ning nõudepesumasinates RSIR-QT tüüpi ja pumba mootor CSR-QT tüüpi [16]. Lisaks mootorite osakaalule on tarvilik arvestada, et osa nendest seadmetest on tänapäeval sagedusmuunduriga, sarnaselt [18] on käesolevas projektis eeldatud 20% sagedusmuunduriga seadmete osakaalu.

Tabel 3.10. Kodumasinade jaotus alamkomponentideks [16]

Külmkappides ning jääkappides kasutatavate kompressorite käivitusmoment ning koormusmoment ei ole suured, seetõttu lähtuvalt doktoritööst [16] ning dokumendist [27] on kompressoreid käitavad mootorid RSIR-CT tüüpi. Muunduriga mootorite osakaaluna kasutatakse 20%, sarnaselt allikale [18].

Soojuspumpades on peamiseks komponendiks kompressor [28], mille osas on eeldatud 80% RSIR-CT tüüpi mootorite osakaalu sarnaselt külmkappidele ning 20% soojuspumpade osas on eeldatud üle 1 kW ühefaasilisi sagedusmuunduriga püsivastumomendiga mootoreid. Äri- ja avaliku sektori kompressorite hulgas eeldatakse 70% ühefaasilise mootoriga seadmete osakaalu, 30% kolmeefaasilise mootoriga seadmete osakaalu ning 20% muunduriga seadmete

osakaalu. Sama ühefaasiliste seadmete osakaalu on kasutatud doktoritöös [23] ning 20% muunduriga seadmete osakaal ühtib allikaga [18]. Õhukonditsioneerid sisaldavad harilikult mahtuvusliku käivituse ning püsitalitlusega mootorit (CSR), kompressoris püsimumendiga mootorit (CSR-CT) ja ventilaatoris kiiruse ruutsõltuvusega momendiga mootorit (CSR-QT) [16]. Ventilaatori osakaaluks õhukonditsioneeride energiatarbes on 12% [26]. Kodutarbijate õhukonditsioneeride osas eeldatakse muunduriga konditsioneeride osakaaluna 20%, sarnaselt allikale [18]. Äri ja avaliku koormusklassi konditsioneeride osas eeldatakse, et 70% on ühefaasilised ning 30% on kolmefaasilised [23] ning ühendatud läbi muunduri lähtudes doktoritööst [16]. Tööstuses kasutatavate õhukonditsioneeride osas eeldatakse sarnasust äri- ja avalik koormusklassis kasutatavate õhukonditsioneeridega.

Järgnevas tabelis on esitatud ühefaasiliste mootorite staatilised pingekarakteristikud, mida kasutati koormusklasside pingekarakteristikute arvutustest. Tabelis on kasutatud järgnevaid tähiseid:

Kolmefaasilised mootorid

Kolmefaasiliste mootorite puhul eristatakse mootoreid lähtudes nimivõimsusest (alla 15 kW või väiksem), ühendusviisist (otseühendusega või läbi sagedusmuunduri ühendatud) ning lähtudes vastumomendist (püsivastumomendiga või kiirussõltuva vastumomendiga).

Üle 15 kW võimsusega kolmefaasilised asünkroonmootorid

Elektrijaamade omatarbes kasutatavate mootorite (hüdrotuhaarastus, kompressorid, kondensaadipumbad, kütuse etteanne, kütuse ettevalmistus, suitsuimejad, toitepumbad, tsirkulatsioonipumbad, ventilaatorid) puhul eeldatakse nimivõimsust üle 15 kW ning väiksemate koostootmisjaamade puhul eeldatakse 20% sagedusmuunduritega mootorite osakaalu.

Elektrijaamade omatarbes kasutatavate mootorite vastumomendist ning käivitusmomendist on kirjutatud konspektis [30]. Konspektis tuuakse välja, et püsivastumomendiga on kraanad, kompressorid, konveierid, purustajad, kuulveskid, kütusesöötjad ja nendel seadmetel on suhteliselt suur käivitusmoment (hõõrdumine). Ventilaatorite vastumomendi kiirussõltuvus on tavaliselt kaks (ruutsõltuvus). Käivitusmoment on ventilaatoritel väike (0,1...0,3) ja on põhjustatud vaid hõõrdekadudest laagrites. Kirjeldatud ventilaatorite moel käituvad: suitsuimejad, puheventilaatorid, ventilaator-veskid, vasturõhuta töötavad pumbad, tsirkulatsioonipumbad, ventilatsioonisüsteemid. Kõrgsurve tsentrifugaalpumpade (toitepumbad, dreanaažipumbad, kondensaadipumbad) vastumomendi sõltuvuse aste pöörlemiskiirusest on kõrgem kui kaks. Nendel pumpadel on nii dünaamiline kui staatiline vastumoment.

Lisaks elektrijaama omatarbe seadmetele eeldatakse suuri mootoreid tööstuses kasutatavate otseühendusega asünkroonmootorite puhul ning 80% äri- ja avaliku teeninduse sektori tsirkulatsioonipumpade osas. Eeldatakse, et neist 80% on otseühendusega ning 20% ühendatud läbi sagedusmuunduri, sarnaselt [18] ja tuginedes allikale [31].

Üle 15 kW nimivõimsusega mootorite staatilised pingekarakteristikud on allika [18] põhjal sarnased sõltumata vastumomendi tüübist ning neid võib modelleerida järgnevalt esitatud pingekarakteristikuga. Sagedusmuunduriga suurte kolmefaasiliste mootorite jaoks kasutati alapunkti lõpus esitatud karakteristikut.

Väiksemad kolmefaasilised mootorid (alla 15 kW)

Alla 15 kW kolmefaasiliste mootorite pingekarakteristikute modelleerimisel on tarvilik nende vastumomendi tüüpi arvestada. Äri- ja avaliku teeninduse sektori koormuse hulgas on väiksemateks kolmefaasilisteks mootoriteks kompressorites ning õhukonditsioneerides kasutatavad mootorid (30% kompressoritest ning õhukonditsioneeridest), mille hulgast on 20% ühendatud läbi sagedusmuunduri. Kompressorite jaoks kasutatakse lähtuvalt eelnevast arutelust püsivastumomenti, õhukonditsioneeride puhul 12% pöörlemiskiiruse ruutsõltuvust ning 88% püsivastumomenti. 80% pumpade ja ventilatsiooni osas eeldatakse kiiruse ruutsõltuvusega kolmefaasilise mootori [17][27] kasutust. Ülejäänud 20% osas eeldatakse läbi sagedusmuunduri ühendatud mootorite kasutust.

Põllumajanduses kasutatavate kompressorite ning tööstusmootorite osas eeldatakse püsivastumomenti, sarnaselt [17]. Pumpade ja ventilatsiooni osas kiiruse ruutsõltuvust [27].

Erineva mehaanilise koormusega alla 15 kW nimivõimsusega asünkroonmootorite staatilised pingekarakteristikud on esitatud järgnevas tabelis. Tabelis on erinevate koormuste kirjeldamiseks kaustatud tähiseid:

Sagedusmuunduriga kolmefaasilised mootorid

Kolmefaasilise mootori sagedusmuunduri juhtimismeetodina eeldatakse lihtsaimat pingesagedus-juhtimist ning pidev- ja katkevoolu režiimi võrdset osakaalu. Eeldatakse sagedusmuunduriga ühendatud mootorite osakaalu 20%, sarnaselt [18] ja tuginedes allikale [31], äri- ja avaliku teeninduse sektori tsirkulatsiooni pumpade, pumpade ning ventilatsiooni hulgas. Samuti äri- ja avaliku teeninduse sektori kolmefaasiliste kompressorite ja õhukonditsioneeride hulgas, mille osa kompressoritest ning õhukonditsioneeridest on eeldatud 30% lähtudes [16].

Tabel 3.14. Kolmefaasiliste sagedusmuundurite mudelid

3.3.2 Koormusklasside pingetundlikkuse tegurid

Summeerides peatükis 3.3.1 kirjeldatud koormuskomponentide pingekarakteristikud lähtudes peatükis 2 esitatud koormuskoosseisudest ja kasutades alapeatükis 3.1 kirjeldatud summeerimise meetodikat, tuvastati järgnevas tabelis esitatud koormusklassidele vastavad pingekarakteristikud.

Tabel 3.15. Koormusklasside staatilised pingekarakteristikud

Joonisel 3.13 on kujutatud koormusklasside aktiivkoormuste pingekarakteristikuid. Jooniselt selgub, et tööstuse ja elektriyaamade omatarbe mudeli pingekarakteristikud on lähedased konstantsele aktiivvõimsusele ning suurima pingetundlikkusega on kodutarbijate aktiivkoormus.

Joonis 3.13. Koormusklasside aktiivvõimsuse pingekarakteristikud.

Järgnevalt reaktiivkoormuse pingesõltuvusi kirjeldavalt jooniselt on võimalik tuvastada, et suurima reaktiivvõimsuse tundlikkusega on kodutarbijad ning äri- ja avaliku teeninduse koormusklassi reaktiivkoormused. Väikseima reaktiivkoormuse pingetundlikkusega on tööstuse ning elektriyaamade omatarbe koormusklasside pingekarakteristikud. Kahe joonise analüüsi tulemusena võivad tööstuse ning väikeste koostootmisjaamade omatarvbe pingekarakteristikud olla sarnased ning seetõttu võib olla võimalik mõlema koormusklassi modelleerimine sama mudeliga ilma olulise veata. Suuremate elektriyaamade omatarbe reaktiivkoormuse pingetundlikkus on mõningal määral erinev ning seetõttu põhjustaks suuremate elektriyaamade omatarbe modelleerimine tööstusklassi mudeliga suuremat viga kui väiksemate koostootmisjaamade modelleerimisel.

Joonis 3.14. Koormusklasside reaktiivvõimsuse pingekarakteristikud.

3.3.3 Võrdlus kirjandusega

Kodutarbijate aktiivkoormuse arvutuslikud pingetundlikkused (joonis 3.15) olid suuremad kui allikas [17] määratud pingetundlikkus. Samuti on võimalik märgata, et kodutarbijate reaktiivkoormuse staatilised pingekarakteristikud (joonis 3.16) olid sarnased allikas [17] esitatud staatilisele pingekarakteristikule.

Joonis 3.15. Kodutarbijate aktiivkoormuse staatilised pingekarakteristikud.

Joonis 3.16. Kodutarbijate reaktiivkoormuse staatilised pingekarakteristikud.

Lähtuvalt allikas [24] esitatud äri- ja avaliku teeninduse sektori tarbijate pingekarakteristikutele (joonised 3.17 ja 3.18) erinevad erinevate tarbijate pingekarakteristikud olulisel määral. Komponentipõhise pingekarakteristiku määramisega tuvastatud aktiivkoormuse staatiline pingekarakteristik on järgneva joonise põhjal lähedane allikas [24] esitatud karakteristikute keskmisele ja sarnaneb allikas [17] komponendipõhiselt määratud aktiivvõimsuse pingekarakteristikule.

Joonis 3.17. Äri- ja avaliku teeninduse aktiivkoormuse staatilised pingekarakteristikud.

Määratud reaktiivvõimsuse staatiline pingekarakteristik on nimipingest kõrgematel pingetel lähedane allika [24] keskmisele, kuid madalamatel pingetel sarnaneb tulenevalt väiksest kõverusest kiirtoidurestorani 5Guys Burger pingekarakteristikule. Kokkuvõttes on määratud äri- ja avaliku teeninduse staatilised pingekarakteristikud kooskõlas kirjanduses esitatud karakteristikutega.

Joonis 3.18. Äri- ja avaliku teeninduse reaktiivkoormuse staatilised pingekarakteristikud.

Koormuskoosseisudest lähtuvalt määratletud põllumajanduskoormuse aktiivkoormuse staatiline pingekarakteristik on joonisel 3.19 väiksema tõusuga kui allikas [17] saadud tulemus, kuid reaktiivvõimsuse pingekarakteristikud joonisel 3.20 on sarnased. Erinevuse põhjuseks on allikas [17] kasutatud suur takistusliku koormuse osakaal (50%), käesolevas aruandes kasutati osakaaluna 17%.

Käesolevas aruandes määratletud tööstuse koormusklassi aktiivkoormuse pingekarakteristikud on lähedased allikale [17] ning reaktiivkoormuse pingetundlikkused on väiksemad. Võrreldes allikaga [24] on erinevused veelgi suuremad. Lähtudes võrdluse tulemustest võivad tööstuskoormuse pingetundlikkused mõningal määral alahinnatud. Arvestades, et elektrijaamade omatarbe mudelid on tööstusele lähedaste pingekarakteristikutega, võivad ka nende koormusklasside pingetundlikkused olla tegelikust väiksemad.

Joonis 3.19. Põllumajanduse, tööstuse, EJ omatarbe ja Veo aktiivkoormuse staatilised pingekarakteristikud.

Joonis 3.20. Põllumajanduse, tööstuse, EJ omatarbe ja Veo reaktiivkoormuse staatilised pingekarakteristikud.

3.4 Sõlmekoormuste pingekarakteristikute tuletamine

Sõlmekoormuste staatiliste pingekarakteristikute arvutamisel võeti aluseks peatükis 3.3. arvutatud koormusklasside staatilised pingekarakteristikud, mille summeerimiseks kasutati peatükis 3.1 kirjeldatud meetodikat. Koormusklasside osakaalud määrati Elektrilevi OÜ varustuspiirkonna sõlmedes Elektrilevi OÜ tarbimisandmete alusel. Elektrilevi OÜ varustuspiirkonna sõlmede koormusklasside koosseise käsitleti aruandes [1]. Muude ettevõtete varustuspiirkondade koormussõlmede jaoks vajalikud andmed koormusklasside koosseisude kohta üldjuhul puudusid ning seal on koormusklasside koosseis ja osakaalud tuletatud üldise teabe ja sõlmede tarbimisstruktuuride sarnasuse analüüsi abil. Elektriijaamade omatarbe mudelit rakendati Balti EJ ja Eesti EJ omatarbesõlmede koormuste modelleerimiseks. Koostootmisjaama omatarbe mudelit (EJ omatarve (CHP)) kasutati Anne CHP, Helme KTJ, Imavere CHP, Pärnu CHP, Sõmerpalu CHP, Vão CHP ja Väike-Maarja CHP koormussõlme puhul.

Koormusklasside mudelite summeerimisel saadud staatilised pingekarakteristikud teisendati PSSE ja PSCAD tarkvara jaoks sobilikumale kujule ning on lisatud aruande lisadena. Lisas L.2. on esitatud PSCAD staatilise koormusmudeli pingetundlikkustegurite väärtused. Lisades L.3. ja L.4. on esitatud PSS/E püsitalitlusarvutustes kasutatava koormusmudeli parameetrite arvutamiseks kasutatavad polünoommodeli summeeritavate kordajad, mille korrutamisel soovitud aktiiv- ja reaktiivkoormusega on võimalik tuvastada modelleerimiseks sobilikud parameetrite väärtused. PSS/E koormusmudeli dünaamikamudeliks teisendamiseks sobilikud tegurite väärtused on esitatud lisades L.6. ja L.7. Nendes tabelites esitatud väärtused on PSS/E tarkvara jaoks sobilikul kujul.

3.5 Kokkuvõte

Kolmandas peatükis käsitletud staatiliste pingekarakteristikute summeerimise meetoodika abil on võimalik summeerida koormuskomponentide karakteristikuid lähtudes komponentide osakaaludest, et määrata koormusklasside pingekarakteristikud. Samuti saab sama meetodikat kasutades summeerida koormusklasside karakteristikud, et tuvastada sõlmekoormuste pingekarakteristikud. Summeerimisel kasutatav koormusmudel on paindlikum ning eeldatavasti ka täpsem kui harilik ZIP või eksponentmudel, kuid võrguarvutustarkvarades rakendamiseks ebasobivas vormis, seetõttu kirjeldati peatükis 3.2 koormuste pingetundlikkust kirjeldavate mudelite parameetrite teisendamist. Samuti käsitleti PSSE ja PSCAD koormusmudeli teisendamise täpsust lähtuvalt võrdlevast modelleerimisest. Ilmnes, et suurima veaga on suurema negatiivse pingetundlikkusega koormusmudelite teisendus.

Peatükis 3.3 käsitleti peatükis 2 nimetatud koormuskomponentide pingekarakteristikuid ning lähtuvalt komponentide pingekarakteristikutest ning peatükis 3.1 kirjeldatud summeerimise meetodikast tuvastati koormusklasside pingekarakteristikud. Kirjandusega võrdlemisel ilmnas, et arvutuslikult tuvastatud kodutarbijate ning äri- ja avaliku teeninduse koormuskarakteristikud on kooskõlas kirjanduses esitatud karakteristikutega. Tööstuse ja elektrijaamade omatarbe aktiivkoormuse pingekarakteristikud olid lähedased püsivõimsusele. Reaktiivkoormuse staatilised pingekarakteristikud olid lähedased kirjanduses esitatud karakteristikutele. Tuvastatud koormusklasside staatiliste pingekarakteristikute summeerimisel tuvastati sõlmekoormuste staatilised pingekarakteristikud. Lisades L.3. ja L.4. on esitatud PSS/E püsitalitlusarvutustes kasutatava koormusmodeli parameetrite arvutamiseks kasutatavad polünoommodeli summeeritavate kordajad, mille korrutamisel soovitud aktiiv- ja reaktiivkoormusega on võimalik tuvastada modelleerimiseks sobilikud parameetrite väärtused. PSS/E koormusmodeli dünaamikamudeliks teisendamiseks sobilikud tegurite väärtused on esitatud lisades L.6. ja L.7. Nendes tabelites esitatud väärtused on PSS/E tarkvara jaoks sobilikul kujul.

3.6 Kasutatud kirjandus

- [1] Treufeldt, Ü., Leinakse, M., Salumäe, U., Sarnet, T., Meldorf, M. Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud. Projekti I etapi aruanne. TTÜ elektroenergeetika instituut, 2015, 305 lk.
- [2] Treufeldt, Ü., Meldorf, M., Leinakse, M., Sarnet, T., Salumäe, U. Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud. Projekti II etapi lõpparuanne. TTÜ elektroenergeetika instituut, 2016, 180 lk.
- [3] Kapp, H. Koormuste modelleerimise erinevused tarkvarades PSCAD ja PSS/E. Bakalaureusetöö. TTÜ elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut, 2017, 69 lk.
- [4] MathWorks R2017a documentation: lsqcurvefit. <http://fr.mathworks.com/help/matlab/ref/lsqcurvefit.html> (12.03.2017)
- [5] MathWorks R2017a documentation: fmincon. <http://fr.mathworks.com/help/matlab/ref/fmincon.html> (12.03.2017)
- [6] OPTI Toolbox: A free MATLAB Toolbox for Optimization. <https://www.inverseproblem.co.nz/OPTI/index.php> (24.03.2017)

- [7] Dennis, J., Gay, D., Welsch, R. Algorithm 573: An Adaptive Nonlinear Least-Squares Algorithm. ACM Transactions on Mathematical Software, Vol 7, No 3, 1981, pp. 367-383.
- [8] Scilab Online Help: leastsq. https://help.scilab.org/docs/6.0.0/en_US/leastsq.html (24.03.2017)
- [9] SciPy: scipy.optimize.curve_fit. https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.curve_fit.html#scipy.optimize.curve_fit (24.03.2017)
- [10] Manitoba HVDC Research Centre. PSCAD User's Guide v4.6.0.
- [11] Siemens Power Technologies International. PSS®E 34 Program Operation Manual. 2015.
- [12] Siemens Power Technologies International. PSS®E 34 Model Library. 2015.
- [13] Siemens Power Technologies International. PSS®E 34 Program Application Guide. Volume 1. 2015.
- [14] MathWareHouse.com. Equation of an Ellipse. Standard Forme quation. <http://www.mathwarehouse.com/ellipse/equation-of-ellipse.php> (22.05.2017).
- [15] Wolfram Research, Inc. Elliptic Curve. <http://mathworld.wolfram.com/EllipticCurve.html> (22.05.2017).
- [16] Collin, A. J. Advanced Load Modelling for Power System Studies. PhD thesis. Edinburgh: The University of Edinburgh, 2013, 300 pp.
- [17] Tellez, A. P. Modelling aggregate loads in power systems. Master thesis. KTH Royal Institute of Technology, 2017, 108 pp.
- [18] Cresswell, C. Steady State Load Models for Power System Analysis. PhD thesis. Edinburgh: The University of Edinburgh, 2009, 312 pp.
- [19] Department of Energy and climate change. Energy Consumption in the UK (ECUK)- Domestic data tables. 2015. <https://www.gov.uk/government/collections/energy-consumption-in-the-uk> (22.04.2017)
- [20] Department of Energy and climate change. Energy Consumption in the UK (ECUK)- Services data tables. 2015. <https://www.gov.uk/government/collections/energy-consumption-in-the-uk> (22.04.2017)
- [21] Waide, P., Tanishima, S. Light's labours lost: Policies for energy efficient lighting. Paris, France: International Energy Agency, 2006, 561 pp.

- [22] Bertoldi, P., Hirl, B., Labanca, N. Energy efficiency status report 2012. Electricity Consumption and Efficiency Trends in the EU-27. Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2012, 143 pp.
- [23] Pollard, W., Ranade, S., Sagi, D. Advanced Load Modeling - Entergy Pilot Study. Technical report 1011391. EPRI, Entergy Inc., 2004.
- [24] Bokhari, A., Alkan, A., Dogan, R., Diaz-Aguilo, M., Leon, F., Czarkowski, D., Zabar, Z., Birenbaum, L., Noel, A., Uosef, R.E. Experimental Determination of the ZIP Coefficients for Modern Residential, Commercial, and Industrial Loads. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 29, No 3, 2014, pp. 1372-1381.
- [25] Electrical Power Research Institute (EPRI). Advanced load modelling. Technical Report 1007318. EPRI, September 2002.
- [26] Tomiyama, K., Daniel, J. P., Ihara, S. Modeling air conditioner load for power system studies. IEEE Transactions on Power Systems, Vol 13, No 2, May 1998, pp 414-421.
- [27] Schneider Electric. Adjustable Frequency Controllers, Technical Report SC100 R5-95. static.schneider-electric.us/docs/Motor%20Control/AC%20Drives/SC100.pdf
- [28] Bachmann, S. Components for Heat Pumps: Compressors. 1. February 2012. <http://airconditioning.danfoss.com/technicalarticles/rc/components-for-heat-pumps-compressors/?ref=17179883240#> (20.04.2017)
- [29] Fraunhofer-Institute for Systems and Innovation Research. Study on the Energy Savings Potentials in EU Member States, Candidate Countries and EEA Countries. Final Report. European Commission Directorate-General Energy and Transport, 2009.
- [30] Tammoja, H. Elektriijaamad. Konspekt. TTÜ elektroenergeetika instituut, 2012, 100 lk
- [31] Bartos, F.J. ABB hosts technology day in Sweden. Control Engineering, Vol 51, No 12, December 2004, pp 16.
- [32] Hajagos, L., Danai, B. Laboratory measurements and models of modern loads and their effect on voltage stability studies. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 2, 1998, pp. 584–592.

4 Pingekarakteristikute katselise määramise võimalused

Aruandes [1] kirjeldati kirjandusest lähtudes sõlmekoormuse pingekarakteristikute mõõtmise põhise määramise meetodikat. Peamiselt on sõlmekoormuste pingekarakteristikute määramiseks sobilike mõõteandmete kogumiseks kaks võimalust: pidevmõõtmiste ja katseliste mõõtmiste teostamine. Esimesel juhul teostatakse koormussõlme mõõtmisi pidevalt ning analüüsiks kasutatavate mõõteandmete valikul otsitakse salvestatud andmetest sobilikke pingehäiringuid. Katseliste mõõtmise korral kutsutakse pingehäiringud harilikult esile kasutades reaktoreid, kondensaatoreid või trafode astmelüliteid. Projekti II etapi aruandes [1] kirjeldati koostatud katsekava, mille testimiseks teostati alates 2016. aasta detsembrist ülekandevõrgus katseid. Katsete teostamise meetodikat on lühidalt käsitletud alapunktis 4.1 ning alapunktis 4.2 on käsitletud 2016. aasta detsembris ja 2017. aasta veebruaris teostatud katsete peamisi leide. Samuti käsitletakse komponentide põhise meetodi rakendamisel koostatud pingekarakteristikute vastavust mõõtetulemustele.

4.1 Teostatud katsete meetodika

4.1.1 Pingemuutuste teostamine ning mõõtmine

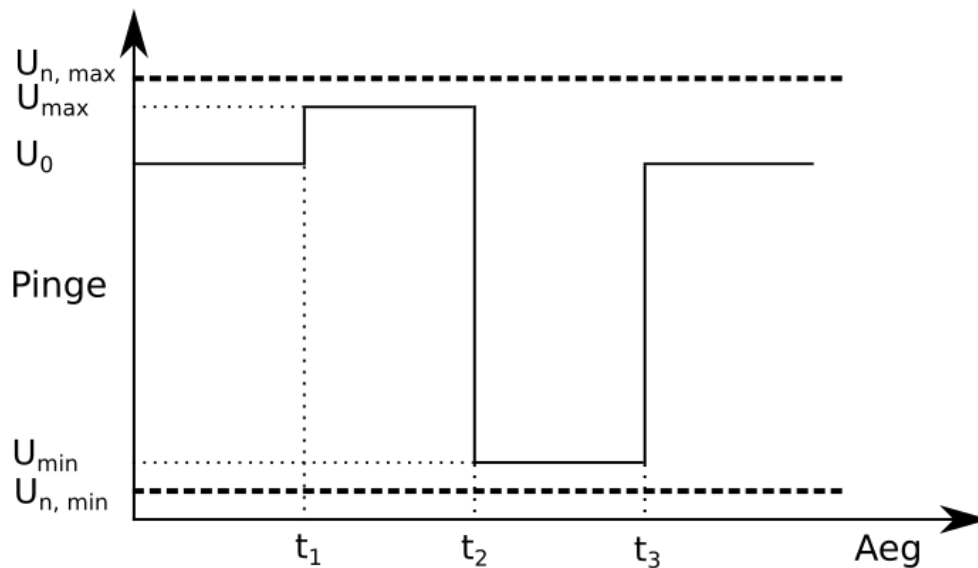
Mõõtepunktide valikul oli üheks valikukriteeriumiks trafode arv: eelistati ühe kuni kahe trafoga alajaamu, sest kasutatavaid mõõteseadmeid Chauvin Arnoux 8352 on kaks ning mõõtes ainult osa koormusest ei saa kindel olla, et ülejäänud sõlmekoormus on sarnase pingekarakteristikuga. Lisaks trafode arvule võeti arvesse alajaama suurust, eeldati, et suuremate alajaamade koormus on stabiilsem, juhuslikud muutused tühistavad teineteist enam kui väiksemate alajaamade puhul. Lisaks eelistati II etapi aruandes kirjeldatud sõlmede grupeerimise tulemustest lähtudes suurema kogutarbimisega koormussõlmede gruppidesse kuuluvaid sõlmi. Mõõtmiste teostamiseks valiti välja Endla, Ida, Järveküla ja Kadaka alajaam, millest Ida ja Järveküla võiksid lähtudes koormussõlmede grupeerimise tulemustest käituda sarnaselt.

Pingehäiringute teostamisel oli peamiseks eesmärgiks elektrivõrgu püsimine normaaltalitluses, pinge kesk- ja madalpingevõrkudes pidi püsima lubatud piirides. Pingehäiringute teostamiseks kasutati 330/110 alajaamades (peamiselt Harku AJ) paiknevaid reaktoreid, et kutsuda esile pingemuutusi Endla, Ida, Järveküla ja Kadaka alajaamas. Reaktorite ühendamisel toimus pingelangus ning reaktorite lahutamisel pingetõus 110 kV ülekandevõrgus. Suuremate pingemuutuste esile kutsumiseks kasutati kohati ka mitme reaktori minimaalse viitega pea sünkroonset lülitamist.

Pingemuutuste teostamisel lähtuti joonisel 4.1 kujutatud põhimõtetest. Pinge alghetkel oli U_0 ning kuni ajani t_1 teostati püsitalitluse mõõtmisi (t_1 oli katsetel harilikult 5...15 minutit). Sõltuvalt pingetasemest U_0 teostati ajahetkel t_1 pingemuutus ja võimalusel valiti muutuse teostamiseks võimalikult suurt pingemuutust võimaldava suunda. Kui pinget tõsteti, siis jälgiti, et saavutatav pingetase $U_{\max} < U_{n,\max}$ ($U_{n,\max}$ on pinge, millega tagatakse normaaltalitlusega lubatud maksimaalne pinge jaotusvõrgus). Kui pinget langetati, siis veenduti, et saavutatav pinge $U_{\min} > U_{n,\min}$ ($U_{n,\min}$ on pinge, millega tagatakse normaaltalitlusega lubatud minimaalne pinge jaotusvõrgus). Tarviliku tingimuse täitmisel jäi süsteem normaaltalitlusele. Kuni ajahetkeni t_2 jätkati mõõtmiste teostamisega (ooteaeg $t_2 - t_1$ vähemalt 5 minutit).

Ajahetkel t_2 teostati teine pingemuutus, vastupidises suunas esimesele pingemuutusele, kuid sarnaselt hoides pinget normaaltalitlusele vastavates piirides. Kuni ajahetkeni t_3 jätkati mõõtmiste teostamisega (ooteaeg $t_3 - t_2$ vähemalt 5 minutit).

Seejärel harilikult korrati pingemuutuste teostamist sarnaselt eelnevalt kirjeldatud loogikale. Viimaks pinge tõsteti või langetati tavapärasele tasemele ning mõõtmist jätkati umbes 10 minutit.



Joonis 4.1. Katseliste pingemuutuste teostamise põhimõte.

Teostatud pingemuutuste mõjude tuvastamiseks ühendati mõõteseadmed, Chauvin Arnoux C. A. 8352, 110 kV alajaamades 110 kV trafode primaarmähise mõõteahelatesse ning mõõtmiste teostamisel kasutati 250 ms diskreetimissammuga mõõtmisi, mis peaksid sobima staatiliste pingekarakteristikute määramiseks. Staatiliste pingekarakteristikute analüüsil on minimaalseks diskreetimissammuks 1 sekund lähtuvalt aruandes [1] esitatud analüüsi tulemustest.

Mõõteseadmete aja sünkroniseerimiseks teostati enne mõõtmiste teostamist aegade sünkroniseerimine kasutades mõõteseadmete GPS mooduleid.

4.1.2 Koormusmudeli pingetundlikkustegurite väärtuste tuvastamine

Parema võrreldavuse huvides kasutati mõõteandmete analüüsil koormuse eksponentmudelit, mida saab esitada järgnevate valemitega:

$$P = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{K_{pu}} \quad (4.1)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{K_{qu}} \quad (4.2)$$

kus:

, – vastavalt koormuse algpinge ning aktiiv- ja reaktiivkoormus algpinge ja nimisageduse korral;

– pinge

, – vastavalt aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkuse tegurid.

Koormusmudeli parameetrite ja väärtuste leidmiseks saab kasutada aruandes [1] kirjeldatud numbrilist meetodit, mille keskmes on arvutusliku võimsuse viga mõõdetud võimsuse suhtes. Aktiivvõimsuse modellerimise viga ε_{iP} saab arvutada igale vaatlusele $i \in \{1, 2 \dots n\}$ kasutades mõõdetud aktiivvõimsuse P_{im} ja arvutatud aktiivvõimsuse $P_{is}(x)$ erinevust:

$$\varepsilon_{iP} = P_{im} - P_{is}(x) \quad (4.3)$$

Mõõdetud andmete ja arvutatud andmete vahelise vea minimeerimiseks on võimalik kasutada vähemruutude meetodit ning formuleerida optimeerimisprobleem järgnevalt:

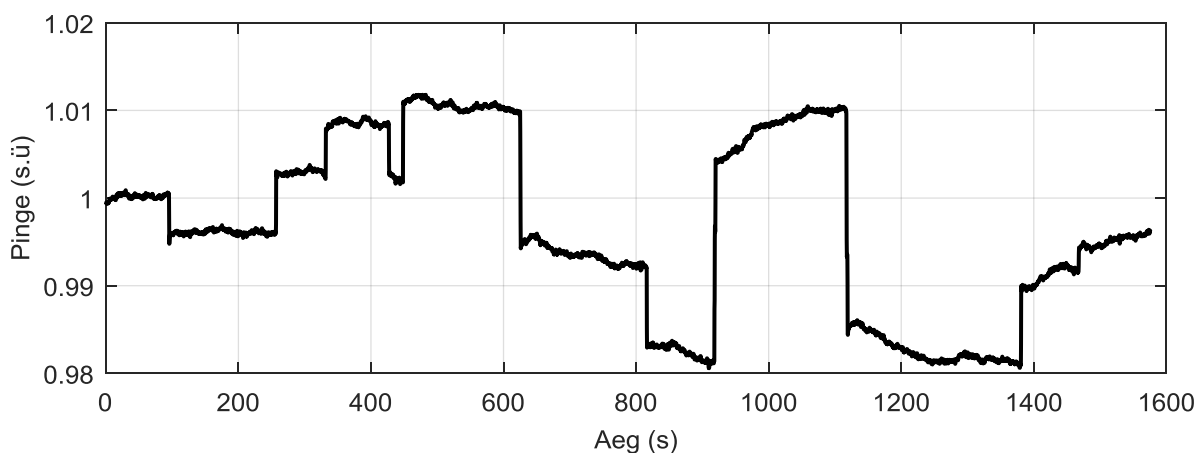
Seega eksponentmudeli aktiivkoormuse pingetundlikkusteguri väärtuse tuvastamiseks on tarvis lahendada järgnev optimeerimisprobleem:

4.2 Talviste katsete tulemused

Talviste koormuskatsete raames teostati mõõtmised alajaamas. Järgnevates alapunktides käsitletakse mõõdetud alajaamades teostatud mõõtmisi eraldi ning üldised leiud esitatakse kokkuvõttes. Iga mõõdetud andmerea puhul teostati lõiguti koormusmudeli parameetrite väärtuste määramine kasutades punktis 4.1.2 kirjeldatud lahendust ning saadud tulemusi võrreldi 3. peatükis koostatud sõlmekoormuste mudelitega. Koormusmudeli pingetundlikkusteguri väärtuse määramisel normeeriti pinget ja võimsust lõigu 25 sekundi keskmise väärtuse suhtes. Joonistel P_I vastab püsivooluga koormuse käitumisele, P_{suvi} ja P_{talv} vastavad peatükis 3 arvatud suvisele ja talvisele koormussõlme pingekarakteristikule ning P_{exp} vastab punktis 4.1.2 kirjeldatud eksponentfunktsiooni lähendusele.

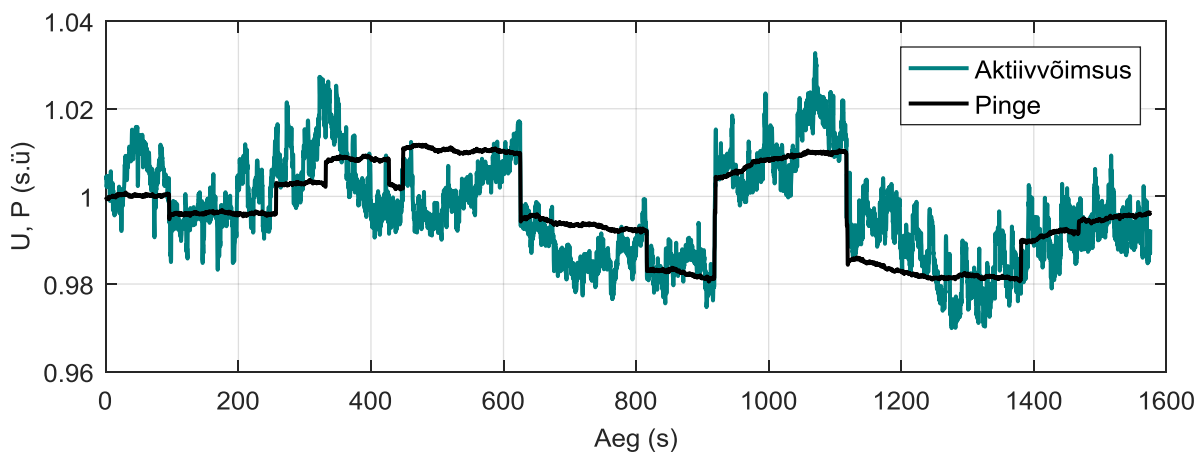
4.2.1 (30.12.2016)

Mõõtmised teostati alajaamas 30. detsembril 2016 ajavahemikus 12:58 kuni 13:22. Pingemuutuste teostamiseks kasutati alajaamas olevaid reaktoreid, suurimate muutuste saavutamiseks lülitati kolme reaktorit minimaalse ajaviitega. Joonisel 4.2 on kujutatud mõõdetud pingemuutusi mõõtmiste algpinge suhtes.



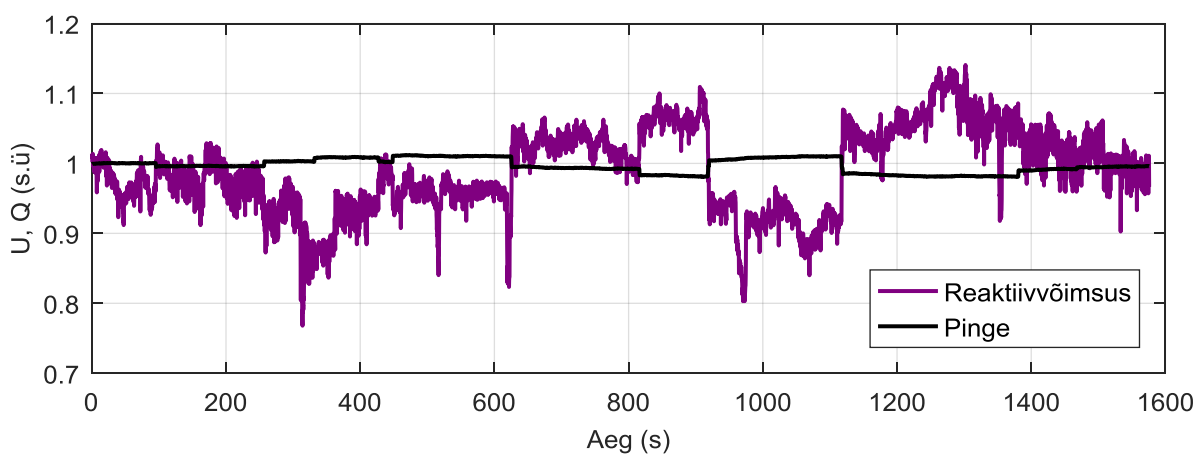
Joonis 4.2. alajaamas mõõdetud pinge.

Joonisel 4.3 on kujutatud alajaamas mõõdetud aktiivkoormust, millest olulise osa moodustab juhuslikult muutuv koormuskomponent. Seetõttu võib koormus samal pingel erinevatel ajahetkedel olulisel määral erineda, näiteks ajahetkedel 200, 700 ja 1500 sekundit on pinge sarnane, kuid võimsused on hinnanguliselt 0,995 s.ü., 0,985 s.ü. ja taas 0,995 s.ü. ehk võimsuste juhuslik komponent nende kolme punkti näitel on 0,01 s.ü ehk 1 protsendipunkt. Juhuslike koormusmuutuste põhjustatava sõlmekoormuse pingetundlikkusteguri mõõtemääramatuse vähendamiseks peaks katseliselt esile kutsutava pingehäiringu eeldatav koormusmuutus olema suurem kui koormuse juhuslikud muutused. Samuti tuleks pingemuutust korduvalt esile kutsuda. Mitme katse korral on lihtsam tuvastada koormuse pingemuutuse põhjustatavat korduvat koormusmuutuse mustrit.



Joonis 4.3. alajaamas mõõdetud aktiivvõimsus ja pinge.

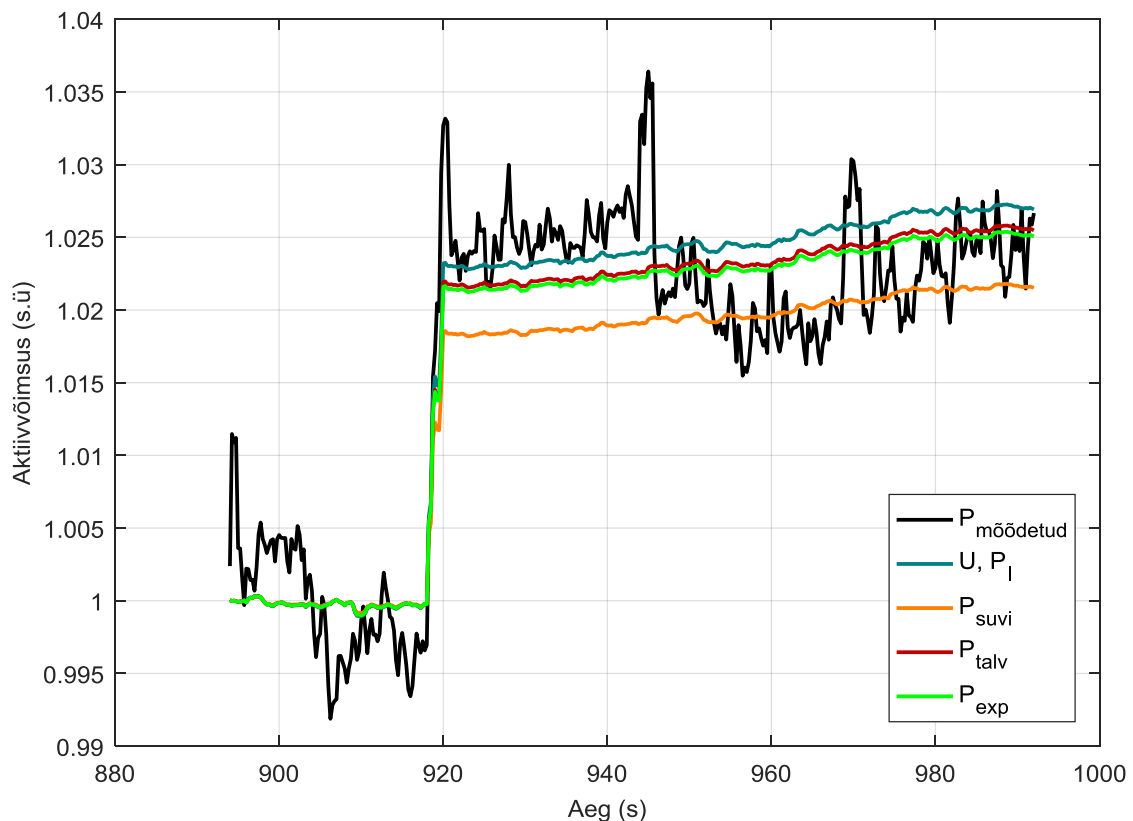
Joonisel 4.4 kujutatud normeeritud mahtvuslik reaktiivkoormus on aktiivkoormusest suurema juhusliku komponendiga, näiteks suhteliselt stabiilse pingega ajaperioodil 900 kuni 1100 sekundit varieerub reaktiivkoormus vahemikus 0.8 kuni 0.95 s.ü.



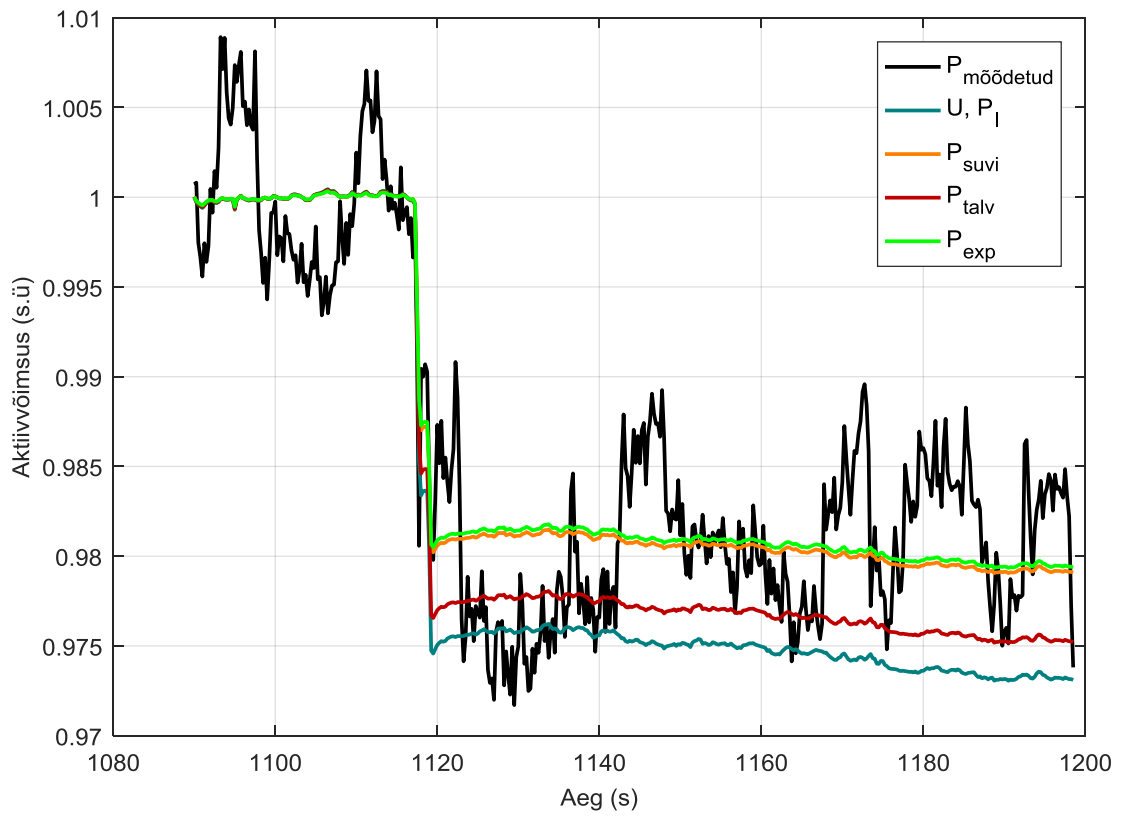
Joonis 4.4. alajaamas mõõdetud reaktiivvõimsus ja pinge.

Punktis 4.1.2 kirjeldatud eksponentmudeli pingetundlikkusteguri väärtuse tuvastamist rakendati alajaamas mõõdetud kahele suurimale pingehüppele ning mõõteperioodi lõpuosale. Joonisel 4.5, 4.5 ja 4.7 on kujutatud aktiivkoormuse tundlikkust pingehüppele. Tabeli 4.1 tulpades „Arvutuslik suvine“ ja „Arvutuslik talvine“ on esitatud peatükis 3 komponentidepõhise meetodiga tuvastatud eksponentmudeli pingetundlikkusteguri väärtused. Tabeli kolmes parempoolses veerus on joonistel 4.5, 4.6 ja 4.7 kujutatud eksponentmudeliga lähendatud koormusele P_{exp} vastavate pingetundlikkusteguri väärtusi. Tabelist ilmneb, et ainult teise löigu (1090...1200 sekundit) korral ei ühti mõõtetulemuste põhjal arvutatud pingetundlikkustegur kolmandas peatükis määratud väärtusega. Erinevuse põhjuseks võib olla halvasti valitud mõõteandmete lõik. Kolme löigu analüüsi põhja võib väita, et sõlmekoormuse komponendipõhisel meetodil määratud aktiivkoormuse pingetundlikkusteguri talvele vastav väärtus olla lähedane õigele väärtusele.

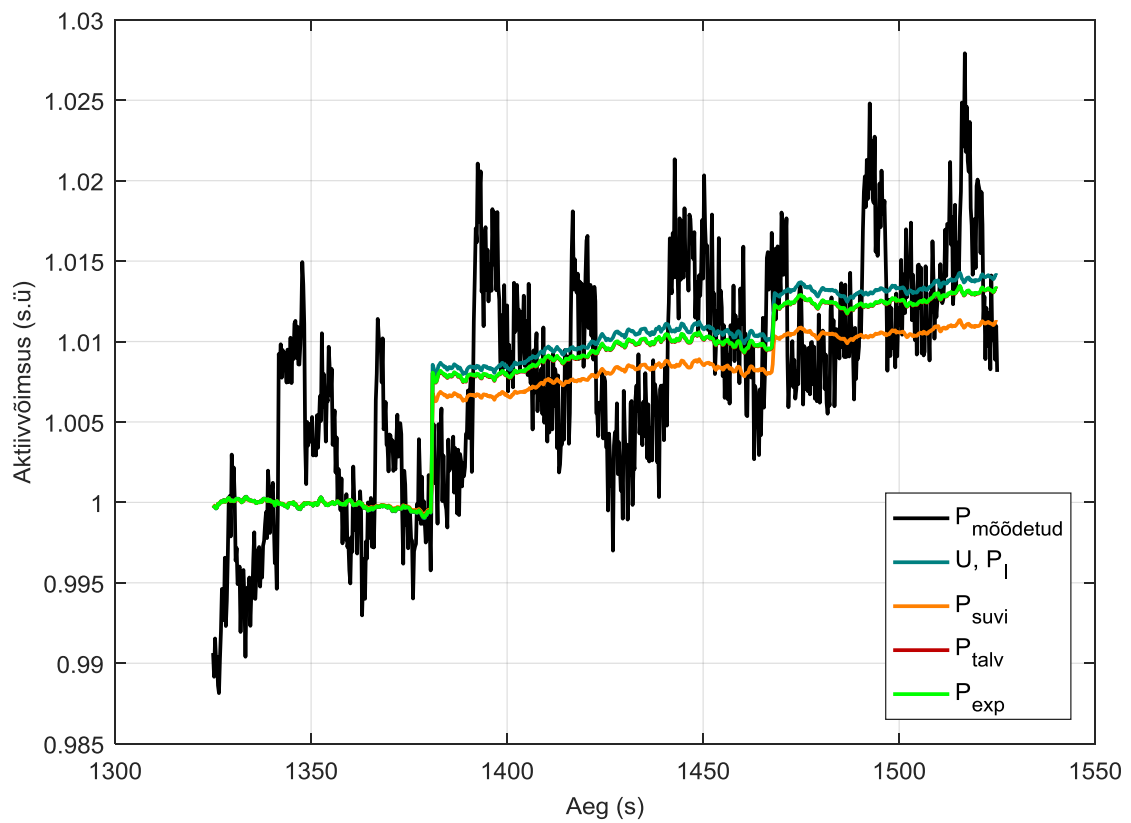
Tabel 4.1. Aktiivkoormuse eksponentmudeli pingetundlikkusteguri väärtus (AJ).



Joonis 4.5. aktiivkoormus ajavahemikul 890...990 sekundit.



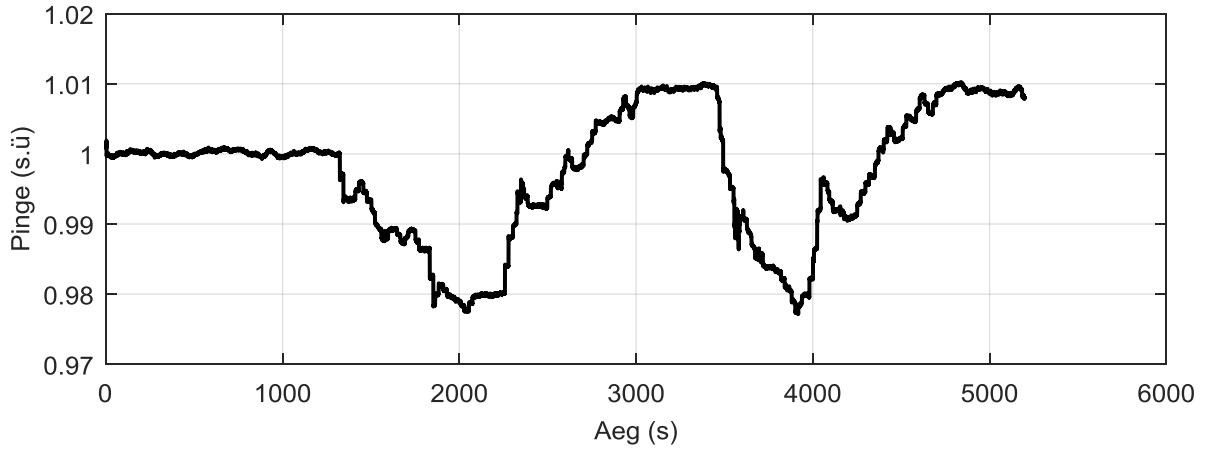
Joonis 4.6. aktiivkoormus ajavahemikul 1090...1200 sek.



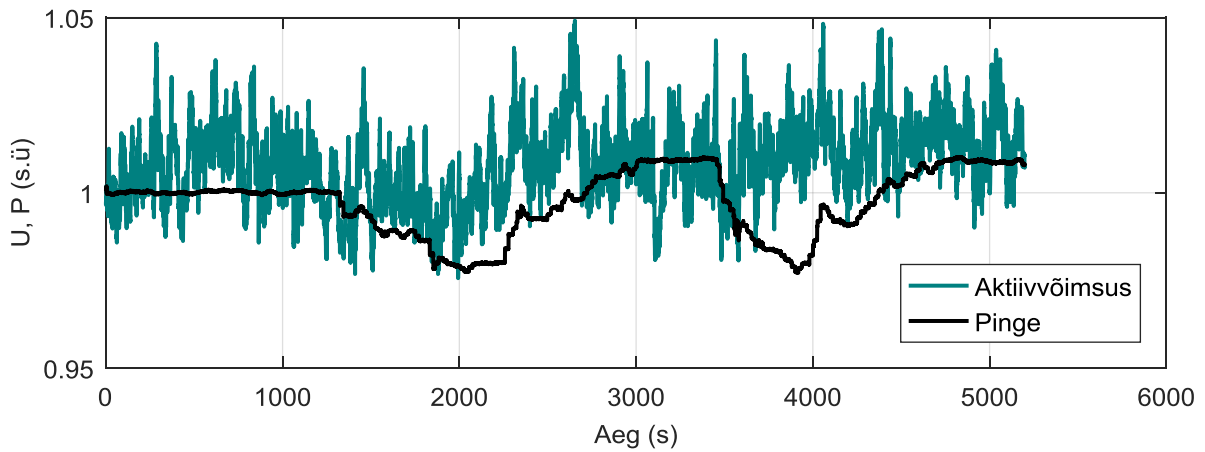
Joonis 4.7. aktiivkoormus ajavahemikul 1325...1525 sek.

4.2.2 (07.02.2017)

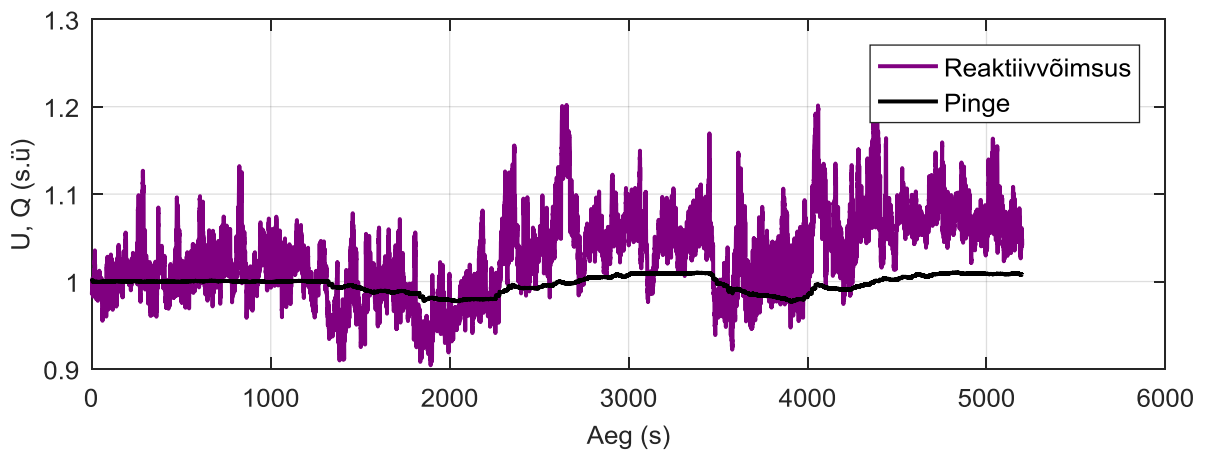
Mõõtmised teostati alajaamas 7. veebruaril 2017 ajavahemikus 12:12 kuni 13:22. Joonise 4.8 põhjal ei olnud pinge muutused sedavõrd sarnased sammhüppele kui katses.



Joonis 4.8. alajaamas mõõdetud pinge.



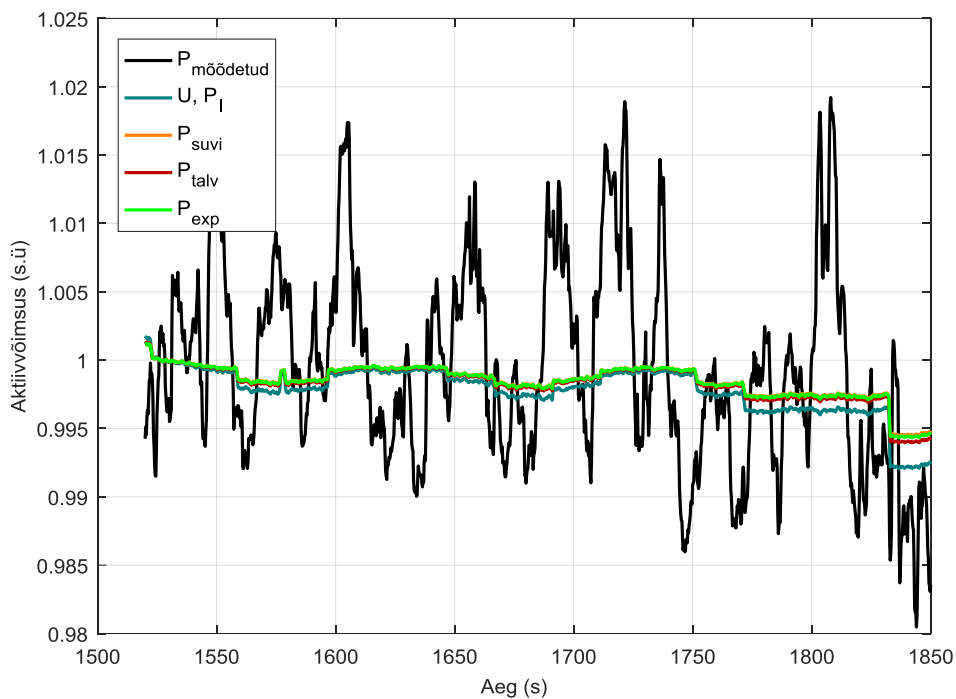
Joonis 4.9. alajaamas mõõdetud aktiivvõimsus ja pinge.



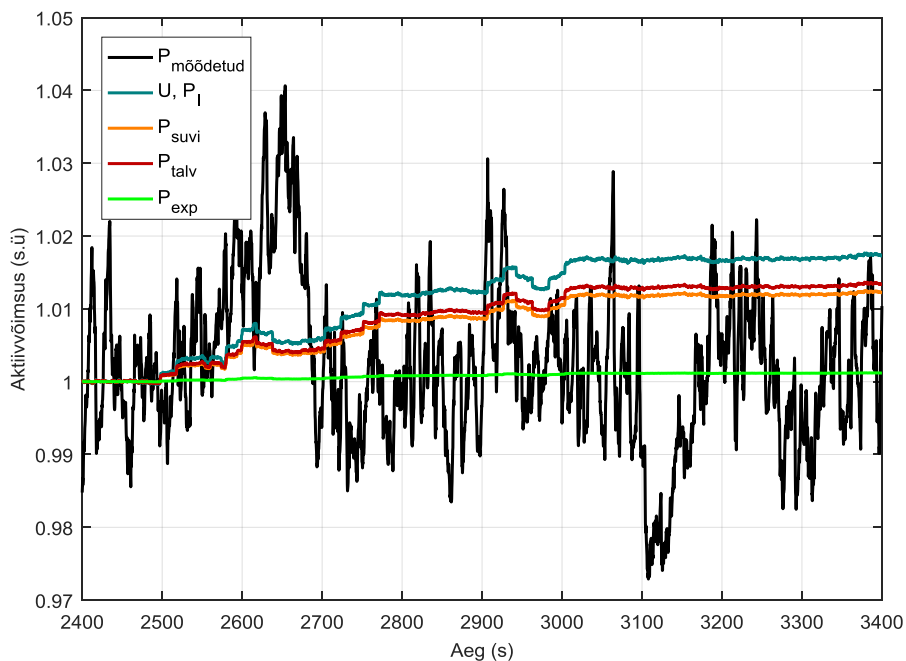
Joonis 4.10. alajaamas mõõdetud reaktiivvõimsus ja pinge.

Analüsitavateks löikudeks valiti esimesel pingelangus 1520...1850 sekundit (joonis 4.11), ligi 1,5% suurune pingetõus (joonis 4.12) ja 1,5% pingelangus (joonis 4.13).

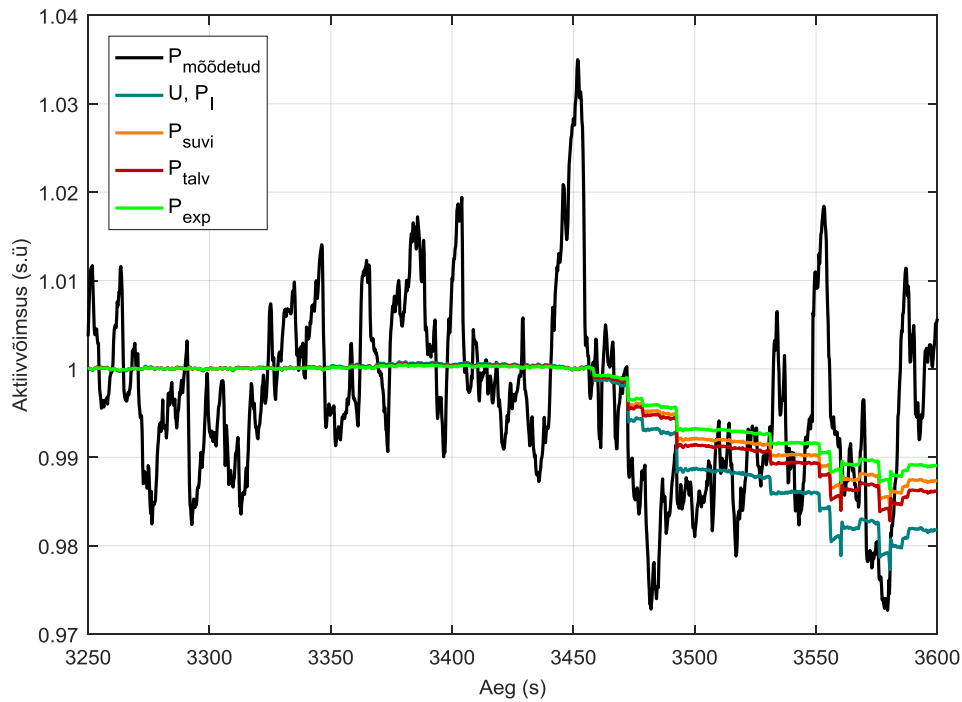
Tabel 4.2. Aktiivkoormuse eksponentmudeli pingetundlikkusteguri väärtus (AJ).



Joonis 4.11. aktiivkoormus ajavahemikul 1520...1850 sek.



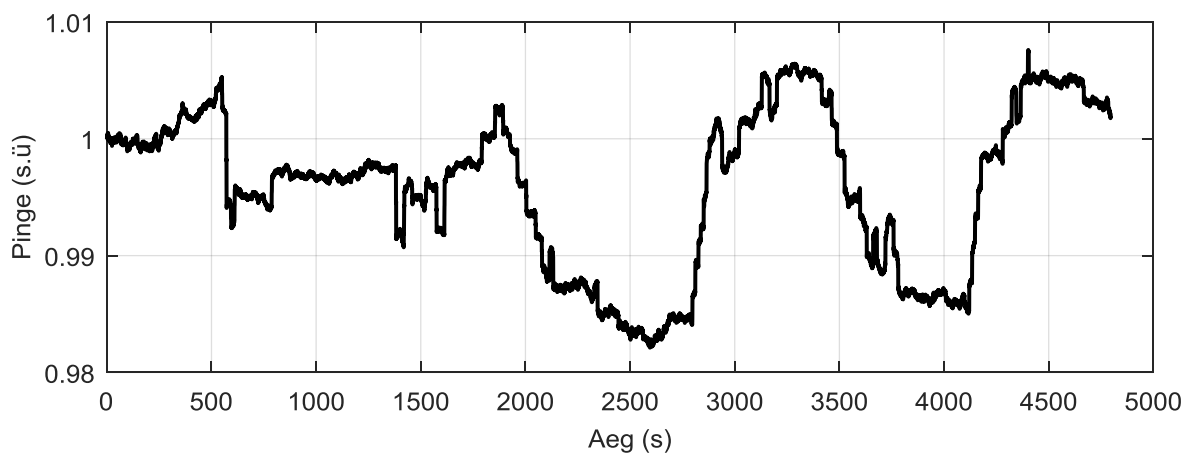
Joonis 4.12. aktiivkoormus ajavahemikul 2400...3400 sek.



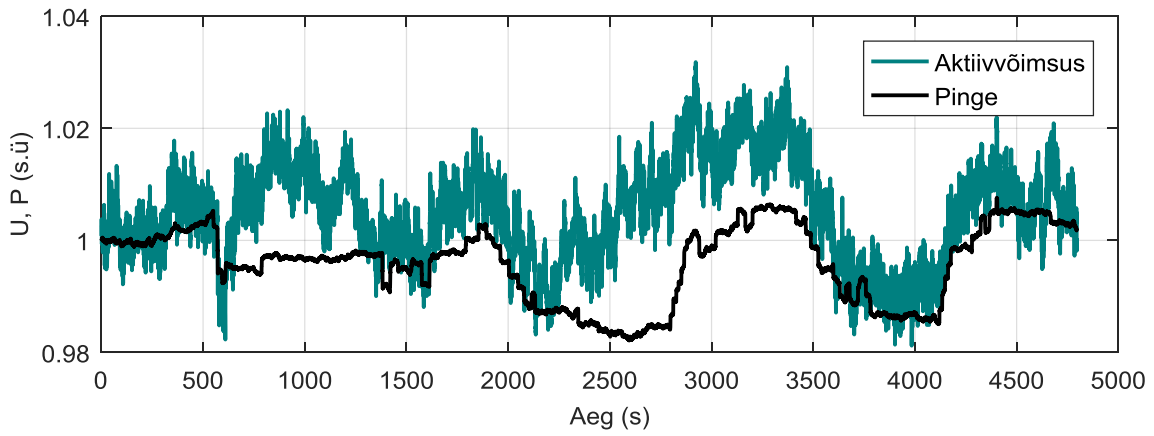
Joonis 4.13. aktiivkoormus ajavahemikul 3250...3600 sek.

4.2.3 (07.02.2017)

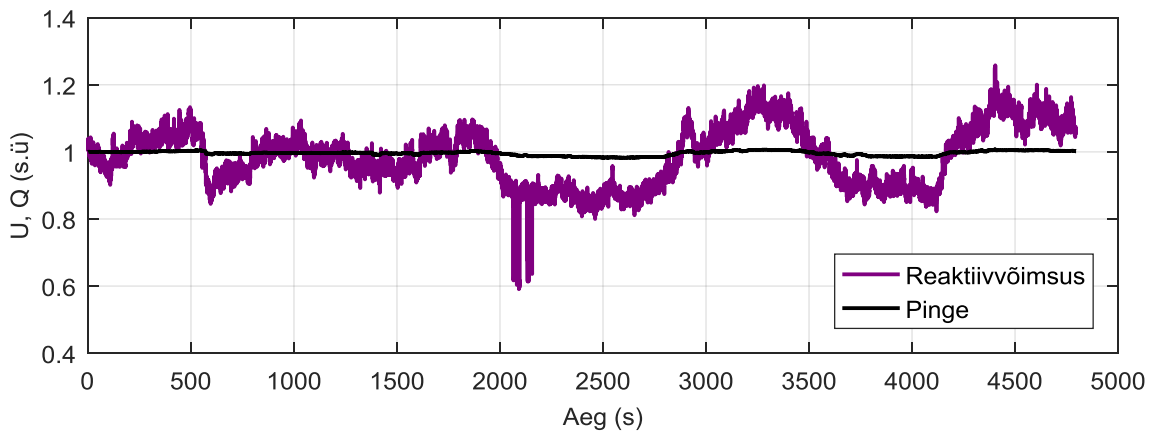
Mõõtmised teostati alajaamas 7. veebruaril 2017 ajavahemikus 09:29 kuni 11:09. Teostati 2 suuremat (umbes 1,5% suurust) pingetõusu ning langust. Ajalõigul 700 kuni 1300 sekundit muutub aktiivkoormuse väärtus hinnanguliselt 1,5% ehk aktiivkoormuse juhuslikud muutused on suhteliselt suured võrreldes katsete käigus teostatavate pingemuutuste eeldatavate mõjudega.



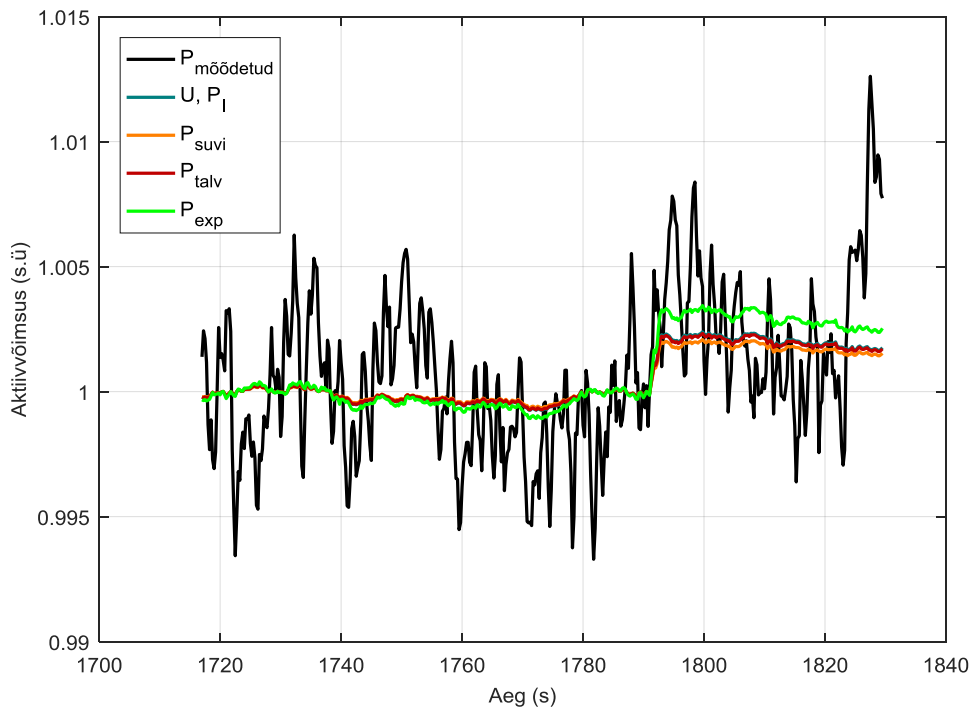
Joonis 4.14. alajaamas mõõdetud pinge.



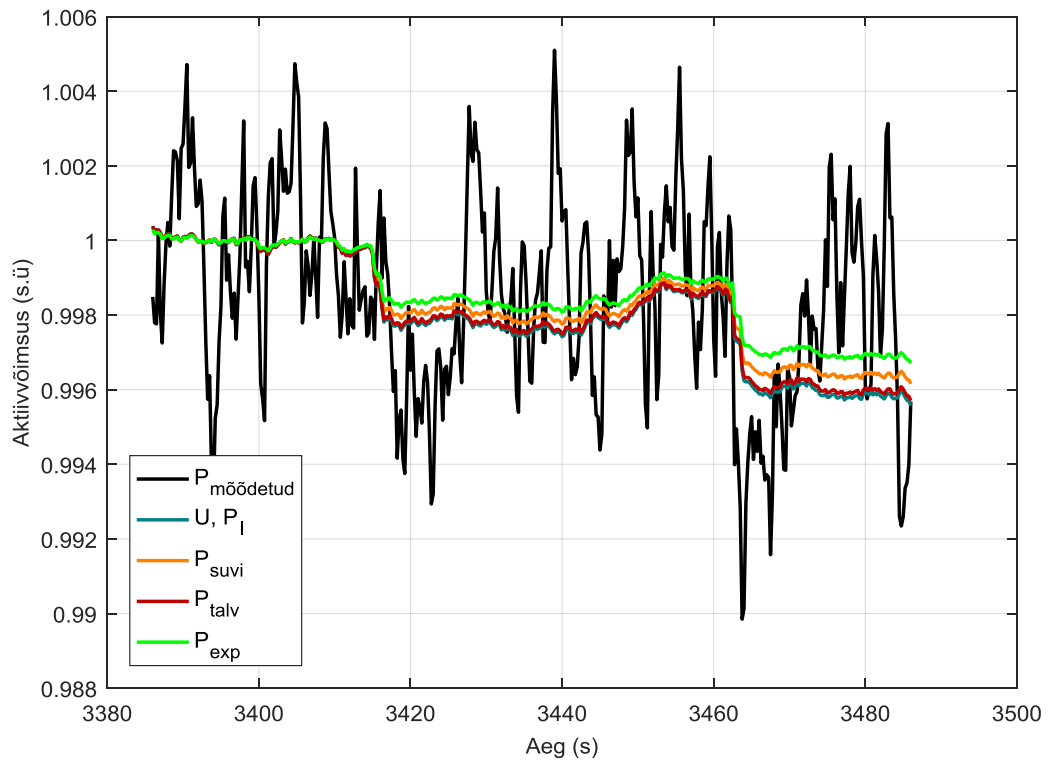
Joonis 4.15. alajaamas mõõdetud aktiivvõimsus ja pinge.



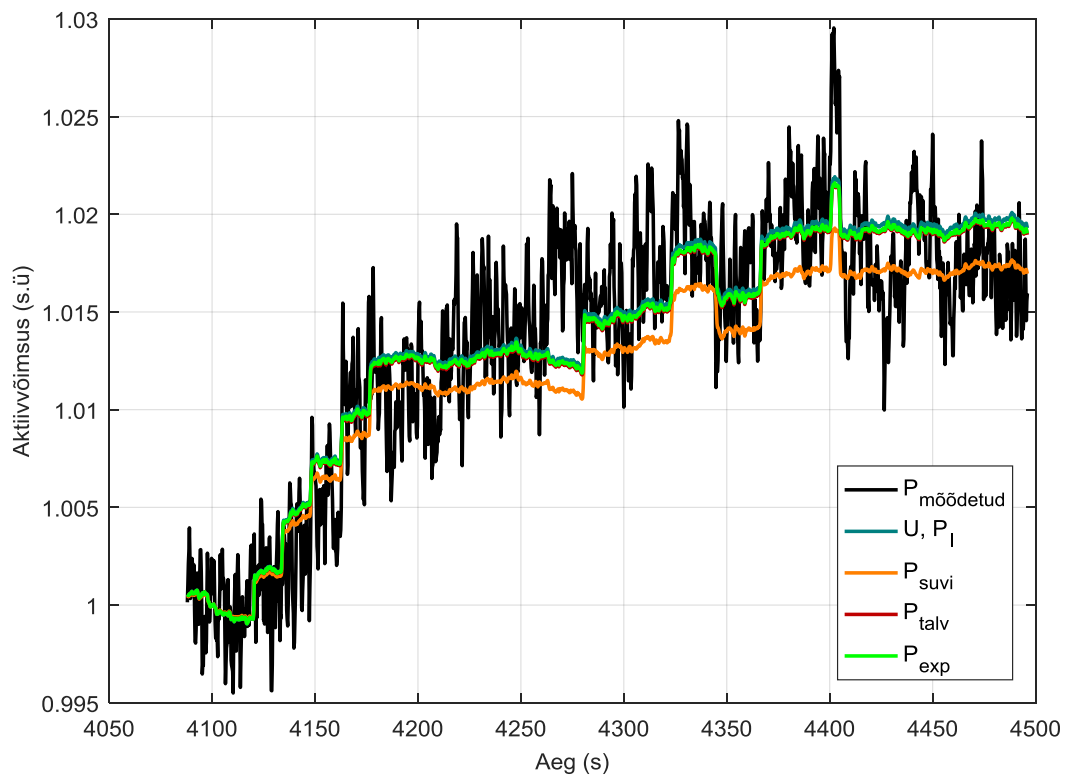
Joonis 4.16. alajaamas mõõdetud reaktiivvõimsus ja pinge.



Joonis 4.17. aktiivkoormus ajavahemikul 1715...1830 sek.



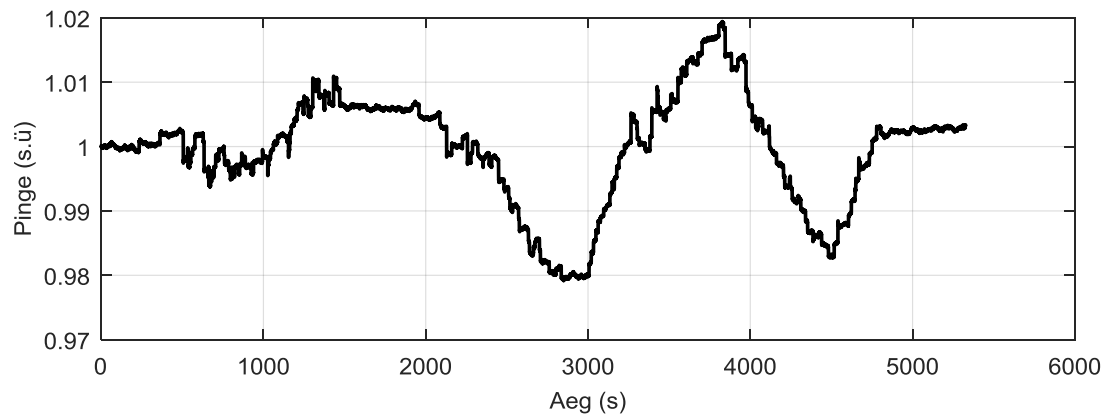
Joonis 4.18. aktiivkoormus ajavahemikul 3385...3485 sek.



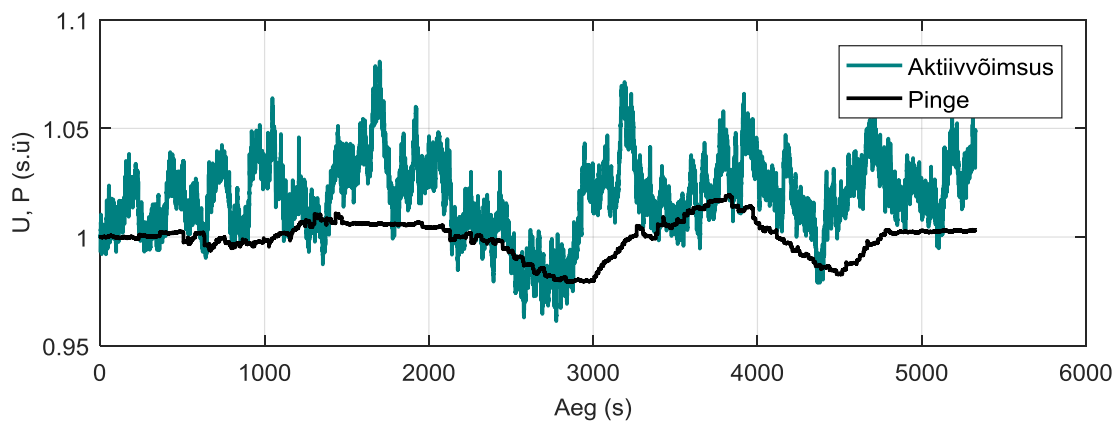
Joonis 4.19. aktiivkoormus ajavahemikul 4085...4500 sek.

4.2.4 (08.02.2017)

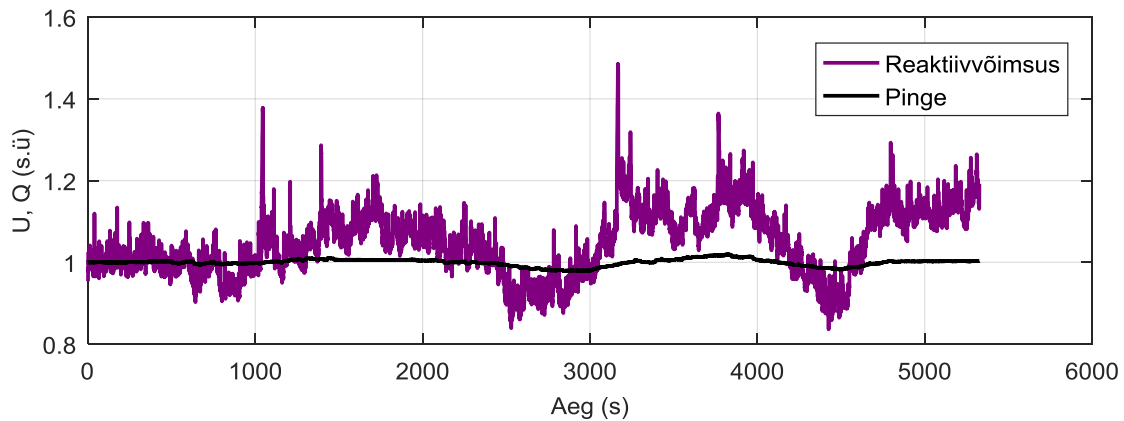
Mõõtmised teostati alajaamas 8. veebruaril 2017 ajavahemikus 12:54 kuni 14:07.



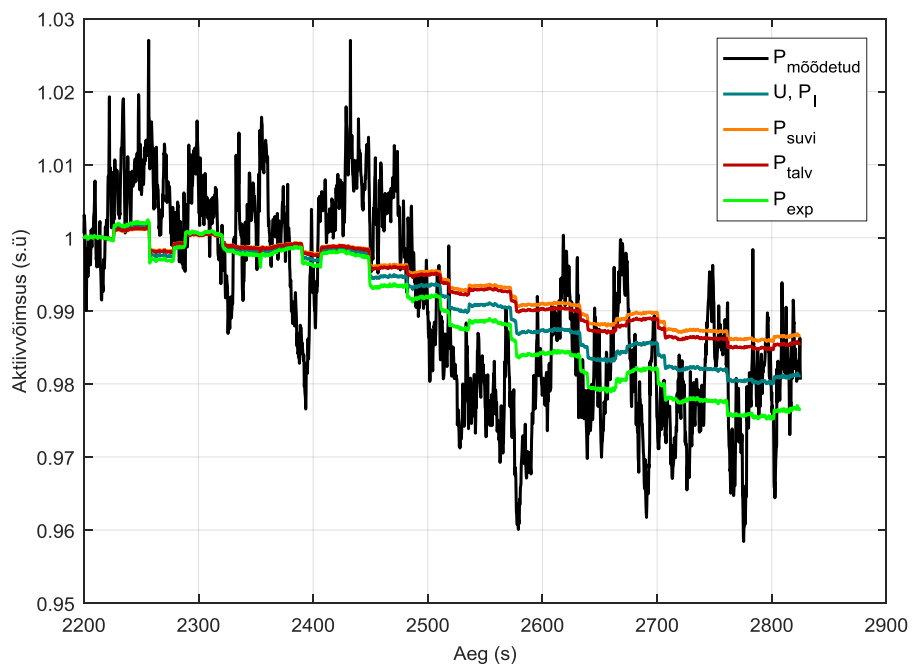
Joonis 4.20. alajaamas mõõdetud pinge.



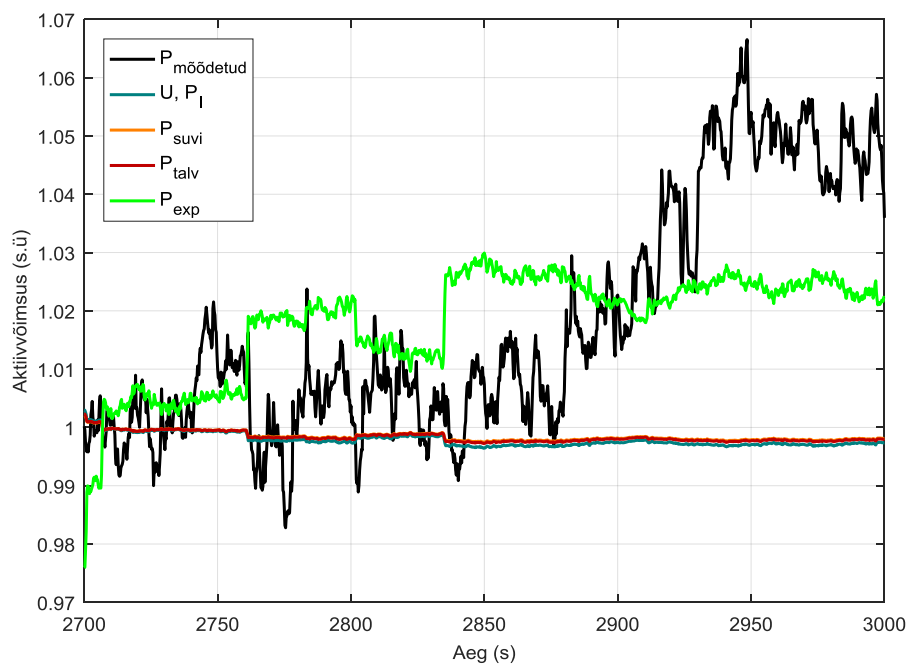
Joonis 4.21. alajaamas mõõdetud aktiivvõimsus ja pinge.



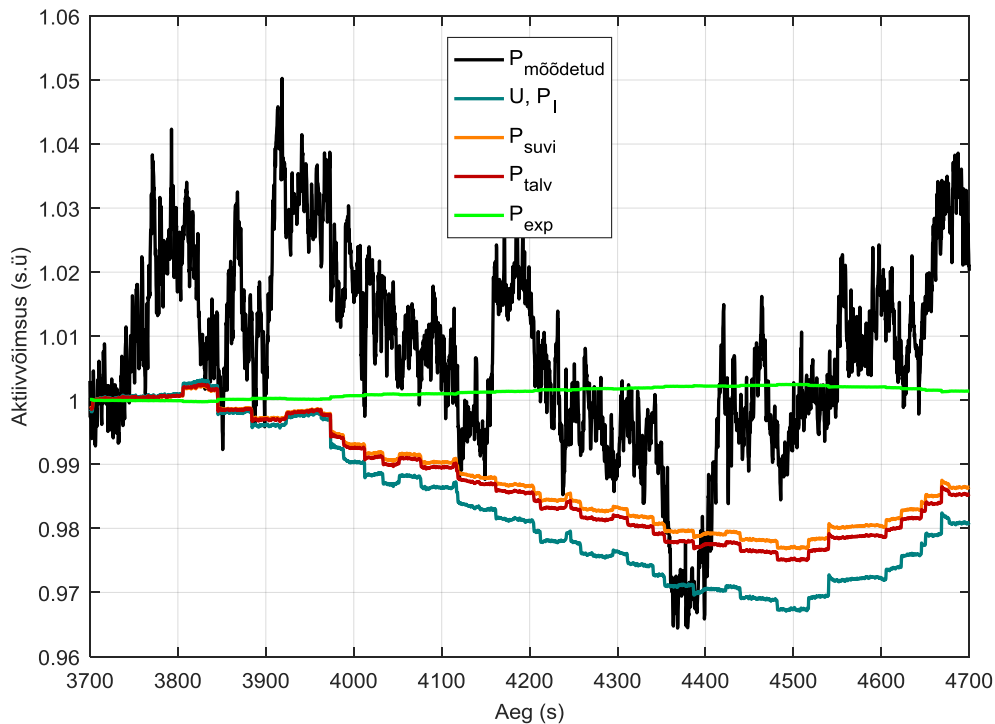
Joonis 4.22. alajaamas mõõdetud reaktiivvõimsus ja pinge.



Joonis 4.23. aktiivkoormus ajavahemikul 2200...2830 sek.



Joonis 4.24. aktiivkoormus ajavahemikul 2700...3000 sek.



Joonis 4.25. aktiivkoormus ajavahemikul 3700...4700 sek.

4.3 Kokkuvõte

Talvel, ajavahemikus 30. detsember kuni 8. veebruar, teostati neli pingemuutmise katset erinevates alajaamades. Kõik neli kirjeldatud katset teostati päevasel ajal, ajavahemikus 9...11; ajavahemikus 12...14.

Katsete käigus mõõdetud pingemuutuste mõju hindamiseks valiti kõikide alajaamade mõõteandmetest 3 lõiku ning tuvastati nendele lõikudel vastava eksponentsiaalse koormusmudeli pingetundlikkusteguri väärtus. Koondtulemused on esitatud järgnevas tabelis. Tabeli põhjal on alajaamas kolmest lõigust kahe puhul teguri väärtus lähedane kolmandas peatükis arvatatud talvisele sõlmekoormuse mudelile. alajaama osas oli ühel lõigul kolmest mõõtmiste põhjal tuvastatud parameetri väärtus lähedane komponendipõhiselt määratud teguri väärtusele. alajaama korral ei ühtinud mõõtmiste põhjal tuletatud parameetrite väärtused eelmises peatükis määratud väärtustega. Põhjuseks võisid olla koormuse juhuslikud muutused, mis ei võimaldanud koormuse pingetundlikkuse mõjude tuvastamist.

4.4 Kasutatud kirjandus

- [1] Treufeldt, Ü., Meldorf, M., Leinakse, M., Sarnet, T., Salumäe, U. Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud. Projekti II etapi lõpparuanne. TTÜ elektroenergeetika instituut, 2016, 180 lk.

5 Sõlmekoormuste sageduskarakteristikud

5.1 Sõlmekoormuste sageduskarakteristikute leidmise põhimõte

Sõlmekoormuste sagedussõltuvuste leidmisel on kasutatud tarbimisstruktuuride ja nende omaduste uurimisel põhinevat komponentidepõhist meetodit. Meetod seisneb „alt-üles“ lähenemisel ja lähtub esmalt aktiivkoormuse ja reaktiivkoormuse sagedussõltuvuste kindlakstegemisest iseloomulike tarbimisseadmetele e koormuskomponentidele. Käesoleva projekti raames on koormuskomponentide sagedussõltuvused leitud kirjandusallikate põhjal. Edasi, teades koormuskomponentide aktiivkoormuste ja reaktiivkoormuste osakaale koormusklassides, saab leida sagedussõltuvused koormusklassidele. Teades koormusklasside osakaale koormussõlmedes, arvutatakse lõpptulemusena välja kõikide vaadeldavate koormussõlmede aktiiv- ja reaktiivkoormuste sagedussõltuvused. Vastavalt PSCAD ja PSS/E tarkvarades kasutatavatele mudelitele on sagedussõltuvused lineaarsed ja neid modelleeritakse lineaarsete funktsioonidega, mille parameetriteks on agregeeritud aktiiv- ja reaktiivkoormuse sagedustundlikkuse tegurid suvisel ja talvisel perioodil. Kuna reaalselt esinevad kõrvalekalded nimisagedusest on piisavalt väikesed, siis on mudelite lineaarsus õigustatud ka juhtudel, kus sageduse suured kõrvalekalded võiksid põhjustada oluliselt ebalineaarseid sagedussõltuvusi. Seega on siin põhimõtteliselt tegu staatiliste sageduskarakteristikutega, mida teatud mõõndusega võiks kasutada ka dünaamiliste protsesside korral.

5.2 Koormuskomponentide sageduskarakteristikud

5.2.1 Koormuskomponendid ja sagedustundlikkuse arvestamine

Lähtudes 2 peatükis esitatud uurimistulemustest võib ka sagedussõltuvuste uurimisel piirduda eri koormusklassidesse kuuluvate iseloomulike ja oluliste koormuskomponentidega vastavalt alljärgnevatele loeteludele.

1. Kodukoormus

- Arvuti/ kaasaskantav arvuti
- Boiler
- DVD-mängija
- Elektriahi
- Elektrikeris
- Elektriküte (sisse-ehitatud)
- Elektripliit
- Elektriradiaatorid
- Kohvimasin

- Kuivati
- Külmkapp
- Laadijad
- Mikrolaineahi
- Miniköök
- Muusikakeskus/ raadio
- Nõudepesumasin
- Pesumasin
- Põrandaküte
- Soojuspump
- Sügavkülmik
- Tolmuimeja
- TV
- Valgustus
- Õhukonditsioneer
- Õhupuhasti/ ventilaator

2. Põllumajanduskoormus

- Elektriküte
- Jahutusseadmed otseühendusega
- Jahutusseadmed sagedusmuunduriga
- Pumbad
- Tööstusmootorid
- Tööstusmootorid sagedusmuunduriga
- Valgustus
- Ventilatsioon otseühendusega
- Ventilatsioon sagedusmuunduriga

3. Äri- ja avalik koormus

- Bürooseadmed
- Elektriküte ja vee soojendamine
- Kompressorid
- Köögiseadmed
- Pumbad
- Serverid
- Sisevalgustus
- Tsirkulatsiooni pumbad

- Ventilatsioon
 - Välisvalgustus
 - Õhukonditsioneerid
4. Tööstuskoormus
- Asünkroonmootorid otseühendusega
 - Asünkroonmootorid sagedusmuunduriga
 - Elektriküte
 - Elektroonika
 - Valgustus
 - Õhukonditsioneerid
5. Elektriyaamade omatarve
- Asünkroonmootorid sagedusmuunduriga
 - Elektrifiltrid
 - Hüdrotuhaarastus
 - Kompressorid
 - Kondensaadipumbad
 - Kütuse etteanne
 - Kütuse ettevalmistus
 - Suitsuimejad
 - Toitepumbad
 - Tsirkulatsioonipumbad
 - Ventilaatorid

– sageduse suhteline erinevus nimisagedusest.

5.2.2 Koormuskomponentide sagedustundlikkuse tegurid

Koormuskomponentide sagedussõltuvuste leidmine aktiivsete katsete abil ei ole praktiliselt teostatav suure töömahukuse tõttu, kuna erinevaid komponente on palju ja osa neist ei ole kättesaadavad. Kuigi antud projekti raamidesse koormuskomponentide katsetel põhinev lähenemine ei mahtunud, võib see olla edasiste uuringute teema. Seega on käesolevas projektis sagedustundlikkuse tegurite leidmisel lähtutud kirjandusallikates leiduvatest andmetest, mille kriitilise analüüsi tulemusel on tuletatud meie regioonile ja käesolevale ajale võimalikult adekvaatsed tegurid. Raskused koormuskomponentidele adekvaatsete sagedustundlikkuste määramisel peegelduvad ka paljudes kirjandusallikates, kus erinevates allikates toodud sagedustegurite väärtused on märgatavalt erinevad, kuna need on leitud erinevatel eeldustel ja erineva tarbimistavade regioonides.

Tulemused erinevad ka vaadeldavate koormuskomponentide suure varieeruvuse tõttu (eri tootjad, erinevad tüübid, erinevad kasutusvaldkonnad jms). Kõige rohkem leidub kirjandusest andmeid kodutarbijate hulka kuuluvate koormuskomponentide sageduskarakteristikute kohta. Teatud mööndustega leiab teavet ka äri- ja avalikus sektoris kasutatavate koormuskomponentide kohta, kuid tööstus- ja põllumajandustarbijate koormuskomponentide sagedustundlikkuse uuringud piirduvad sageli vaid mingi konkreetse objektiga või mingite ligikaudsete keskmiste tegurite leidmisega. Kirjandusallikate hindamisel on võetud arvesse ka tehtud uuringute ajaline mõõde, kus pakutavad andmed võivad pärineda eelmistest kümnenditest ning sellest ajast võivad osa koormuskomponentide iseloom ja sagedussõltuvused olla üksjagu muutunud. Seega on antud uurimistöös võetud aluseks võimalikult uuemaid andmeid, niivõrd kuivõrd need on olnud kättesaadavad [1].

Kirjandusallikatest leiduvate andmete analüüsiks on kõikvõimalikud koormuskomponendid jagatud viide iseloomulikku rühma.

1. Elektroonikaseadmed
2. Aktiivtakistuslikud seadmed
3. Mootorajamitega seotud seadmed
4. Valgustid
5. Muunduritega seadmed

Elektroonikaseadmete rühm on nii kodumajapidamises kui ka avalikus sektoris väga lai. Seepärast on elektroonikarühma seadmetele leitud hinnangulised keskmised sageduskarakteristikud [2]. Keskmiste sagedustundlikkuse tegurite leidmisel on arvestatud ka andmete vanusega, kuna elektroonikaseadmed on ajas üks kõige kiiremini muutuv koormuskomponent. Suurema osakaaluga (60% vs 40%) on arvestatud uuemaid andmeid.

Näitena on tabelis 5.1 välja toodud kirjandusallikatest leitud elektroonikaseadmete sagedustundlikkuse tegurid.

Tabel 5.1. Elektroonikaseadmete sagedustundlikkuse tegurid

Tulemustest joonistub välja kaks erinevat väärtuste rühma, kus allika [3] reaktiiv koormuse sagedustundlikkustegurid erinevad teiste artiklite tulemustest oluliselt. Selle erinevuse põhjuseks on eri allikate vanus, kus allikas [3] on avaldatud 2016. aastal ning ülejäänud ([4], [5], [6], [7], [8], [9]) jäävad eelmistesse kümnenditesse. Seetõttu võib oletada, et 2016. aastal viidi katsed läbi uuema tehnoloogiaga ning need sagedustundlikkustegurid on tänases kontekstis adekvaatsemad.

Kahjuks paljudes asjakohastes kirjandusallikates ei ole koormuskomponentide sagedustundlikkus põhiteemaks. Näiteks, allikas [4] käsitletakse seda kõrvalteemana, kui analüüsitakse Tai elektrisüsteemi koormuse mudeli täpsuse mõju sageduse stabiilsuse analüüsile. Artikkel ilmus 2001. aastal ja selle lähtekohaks oli Tai elektrisüsteemis esinenud sageduse lohk sügavusega 0,8 Hz.

Aktiivtakistuslike seadmete koormus ei sõltu võrgusageduse muutustest ning neid modelleeritakse konstantse takistusega. Vaid väga kõrged sagedused, mis on seotud kõrgemate harmoonikutega, võivad põhjustada mõningal määral selliste koormuste võimsuse muutumist, näiteks esineva pinnaefekti tõttu. Aktiivtakistuslikel seadmetel puudub reaktiivtakistus ja nad ei vaja töötamiseks reaktiivenergiat, seega on nende koormuskomponentide sagedustundlikkustegurid nii aktiiv- kui ka reaktiivkoormuse osas nullid. Aktiivtakistusega seadmete rühma kuuluvad esmajoones mitmesugused kütte- ja soojendusseadmed. Näited on toodud tabelis 5.2.

Vaadeldavas rühmas domineerivad kindlasti kütteseadmed ja boilerid kuna köögiseadmete (pliidid, keedukannud, rösterid jms) energiatarbimine on tunduvalt väiksem. Aktiivtakistuslikel seadmetel on suurem osakaal kodutarbijate ja avaliku koormuse juures, kuid tööstuses on nende osakaal tunduvalt väiksem.

Mootorajamitega seadmete koormuse sagedussõltuvus oleneb sellest, kuidas mootor on võrguga ühendatud. Kui mootor on ühendatud võrku sagedusmuunduri või alaldi kaudu, siis mootori poolt tarbitav võimsus ei sõltu sagedusest. Käesolevas lõigus käsitletakse vahetult võrku ühendatud mootoreid, mille tarbitav võimsus, nii aktiiv- kui ka reaktiivvõimsus on otseses sõltuvuses sagedusest. Mootorite sagedussõltuvuse põhimõtet on lähemalt selgitatud projekti eelnevate etappide aruannetes. Lühidalt meenutades: kuna mootori pöördemoment ja seega ka võimsus on seotud pöörlemiskiirusega ja pöörlemiskiirus sõltub sagedusest, siis ka mootori võimsus sõltub sagedusest. Oluline on siinjuures mootori mehaanilise koormuse tüüp, mille tõttu võivad võimsuse sagedussõltuvuse tunnusjooned olla erinevatel seadmetel vägagi erinevad. Kirjandusallikas [5], mille ilmumisaasta on küll 1982, märgitakse, et isegi täpselt samade mootorite sageduskarakteristikud võivad erineva vanusega mootorite puhul olla mõnevõrra erinevad.

Mootorite osatähtsus üldises koormuses on suur ja nende mõju koormusele on paljudel juhtudel suurem kui teistel elektrilistel komponentidel. Näiteks on asünkroonmootorite osakaal kogu koormusest umbes 60% [10]. Ka on mootorite sagedustundlikkuse tegurid võrreldes teiste seadmetega suhteliselt suured.

Sagedustundlikkuse hindamisel tekitab mootorite juures lisaprobleeme ka pinge samaaegne muutumine, mille tulemusel on adekvaatsete sagedusekarakteristikute määramine raskendatud. Suuremad mootorite rühma sagedussõltuvustegurite hajuvused esinevad tööstuses, kuna selle koormusklassi koosseisu kuulub väga suur hulk erinevat tüüpi ja erineva võimsusega ning eri vanusega mootoreid erinevatelt tootjatelt.

Oluliselt erineva sagedustundlikkusega on otse võrku ühendatud ja läbi sagedusmuundurite võrku ühendatud mootorid. Kirjandusallika [6] andmetes on osa mootorite sagedustundlikkuse tegurid leitud laboratoorsete katsetuste tulemusel. Läbi sagedusmuunduri ühendatud mootori

koormus on põhiliselt sageduse (normaalselt väikestest) kõrvalekalletest sõltumatu. Näiteks 2002. aastal oli kodumajapidamises kasutusel olevate sagedusmuunduriga ühendatud ühefaasiliste mootorite osakaal Jaapanis 37% [11]. Allika [12] kohaselt on sagedusmuunduriga ühendatud mootorite osakaal väiksema võimsuse juures kuskil 5% ning suurema võimsuse juures kuskil 20% ning need protsendid edaspidi kasvavad.

Näitena on tabelis 5.3 esitatud kirjandusallikates leiduvad sagedustundlikkuse tegurid erinevate mootorajamitega seadmete korral. Kirjandusallikate analüüsi tulemusel võib tõdeda, et mootorite rühmas väga suuri erinevusi kirjandusallikate andmete vahel esine, kuna üldjuhul on mootorite üldised ehituspõhimõtted jäänud viimastel aastakümnetel samaks. Siiski on eri koormusklassides kasutusel mõnevõrra erinevat tüüpi mootorid ja nii võivad mootorite sagedustundlikkuse tegurid erinevates koormusklassides olla pisut erinevad.

Tabel 5.3. Mootorajamitega seadmete sagedustundlikkuse tegurid

Valgustite rühma seadmed võib jagada valgusallikate alusel kahte erineva sagedussõltuvusega gruppi:

- hõõg- ja halogeenlampidega valgustid
- lahenduslampidega valgustid.

Traditsiooniliste hõõglampide kasutus väheneb iga aastaga ning selle asemele tulevad efektiivsemad ja säästlikumad valgusallikad. Hõõglamp ei tarbi reaktiivenergiat ja tema koormus on aktiivtakistuslik ja sagedusest praktiliselt sõltumatu.

Lahenduslampide alla kuuluvad luminofoor-, halogeniid-, naatrium- ning elavhõbelambid. Lahenduslambid esinevad tüüpiliselt tänavavalgustites, tööstuses ja kaubanduses. Nende sagedussõltuvus on siiski suhteliselt väike, mida tõendavad ka küllaltki väikesed sagedustundlikkuse tegurid. Kirjandusallikas [3] leiduvad seitsme erineva säästulambiga tehtud katsetulemused, mis näitavad, et kõikide nende lampide sagedustundlikkuse tegurid on nullid. Tabelis 5.4 on näited erinevate lampide kirjandusallikatest leitud sagedustundlikkuse teguritest.

Tabel 5.4. Eri tüüpi lampide sagedustundlikkuse tegurid

Muunduritega seadmetel (ühendatud läbi sagedusmuundurite ja/või alaldite) sagedustundlikkus praktiliselt puudub ja nende sagedustundlikkuse tegurid võib võrdsustada nulliga: $K_{pfk} = 0$ ja $K_{qfk} = 0$.

5.2.3 Koormuskomponentide sagedustundlikkuse tegurid ja osakaalud koormusklassides

Uurimistulemuste alusel saab koormuskomponendid jagada sagedustundlikkuse järgi kolme iseloomulikku rühma.

- negatiivse sagedustundlikkusega koormuskomponendid
- väikese või puuduva sagedustundlikkusega koormuskomponendid
- positiivse sagedustundlikkusega koormuskomponendid

Kuna aktiivkoormuse ja reaktiivkoormuse sagedustundlikkused on üldiselt erinevad, siis on allpool iseloomustatud rühmi eraldi nii aktiiv- kui ka reaktiivkoormuse järgi.

Aktiivkoormuse järgi moodustavad negatiivse sagedustundlikkusega rühma koormuskomponendid, mille sagedustundlikkus tegur paikneb vahemikus $-2 < K_{pfk} < -0,1$. Siia kuuluvad näiteks ventilatsioon, suitsuimejad, ventilaatorid, õhupuhastid.

Väikese või puuduva sagedustundlikkusega rühma võib võtta seadmed, mille sagedustundlikkuse tegur asub piirides $-0,1 < K_{pfk} < 0,1$ ja mis tavaliselt võrdub nulliga. Sellesse rühma kuuluvad näiteks kõik kütteseadmed, boilerid, veekeetjad, kerised, pliidid, aga ka serverid, elektrifiltrid, nõudepesumasinad, tolmuimejad, alaldid, sagedusmuunduritega seadmed jms.

Positiivse sagedustundlikkusega seadmete rühma võib arvata need, mille sagedustundlikkuse tegur on tavaliselt piirides $0,1 < K_{pfk} < 3,0$, nagu näiteks välisvalgustus, külmikud, konditsioneerid, soojuspumbad, kompressoriid, pesumasinad, pumbad ja muud mootorajamitega kodu- ja tööstusseadmed.

Reaktiivkoormuse järgi kuuluvad negatiivse sagedustundlikkusega rühma näiteks kuivatid, konditsioneerid, bürooseadmed, elektroonika, välisvalgustus, külmikud, televiisorid, ventilaatorid ja mitmesugune mootorajamitega kodutehnika. Selliste seadmete sagedustundlikkuse tegurid paiknevad tüüpiliselt vahemikus $-3 < K_{pfk} < -0,4$.

Väikese või puuduva sagedustundlikkusega rühma kuuluvad reaktiivkoormuse järgi näiteks elektriküte ja vee soojendamise, elektrifiltrid, elektripliidid, laadijad, tolmuimejad, elektrikerised, pörandaküte, ja mitmesugused sagedusmuunduritega ühendatud mootorajamitega seadmed.

Positiivse sagedustundlikkusega seadmete rühma võib arvata need, mille reaktiivkoormuse sagedustundlikkuse tegur on tavaliselt piirides $0,4 < K_{pfk} < 2,0$, nagu näiteks pesumasinad, tööstusmootorid, vedelikupumbad, kompressoriid ja mitmed elektrijaamade omatarbeseadmed.

Siinjuures tuleb tähele panna, et isegi samadesse koormusrühmadesse kuuluvatel seadmetel võivad tulenevalt koormusklasside spetsiifikast olla erinevates koormusklassides erinevad sagedustundlikkuse tegurid. Näiteks koduvalgustid versus äri- ja avaliku sektori valgustid, kodumajapidamismootorid versus tööstusmootorid jne.

Kirjandusallikates toodud andmete vanuse, regionaalse vastavuse ja hinnangulise usaldatavuse põhjal kaalutud keskmiste järgi on leitud koormuskomponentidele koormusklasside kohased aktiiv- ja reaktiivkoormuste sagedustundlikkuse tegurid ning ka osakaalud erinevates

koormusklassides. Koormuskomponentide osakaalud koormusklassides on leitud käesoleva aruande 2. peatükis. Allpool on koormuskomponentide aktiiv- ja reaktiivkoormuste sagedustundlikkuse tegurid koondatud koormusklasside kaupa tabelitesse 5.5 kuni 5.10.

Tabel 5.5. Kodu koormusklassi ($i = 1$) koormuskomponentide sagedustundlikkuse tegurid ning koormuskomponentide osakaalud koormusklassis suvisel ja talvisel perioodil

Nimetatud tabelites on toodud koormuskomponentide aktiiv- ja reaktiivkoormuste osakaalud C_{pki} ja C_{qki} koormusklassis i ja koormuskomponentide sagedustundlikkuse tegurid K_{pki} ja K_{qki} vastavalt aktiiv- ja reaktiivkoormuse jaoks. Kodukoormusklassi jaoks on tuvastatud koormuskomponentide osakaalud eraldi suviseks ja talviseks perioodiks.

Teistes koormusklassides peale kodukoormuse ei olnud võimalik andmete puudulikkuse tõttu suviseid ja talviseid koormuskomponentide osakaale eristada ning seega vaadeldakse aasta keskmisi osakaalude väärtusi.

Tabel 5.6. Põllumajanduse koormusklassi ($i = 2$) koormuskomponentide sagedustundlikkuse tegurid ja osakaalud koormusklassis

5.3 Koormusklasside sageduskarakteristikud

Vaatluse all on viis koormusklassi, kusjuures viies klass jaguneb veel omakorda kaheks alamklassiks:

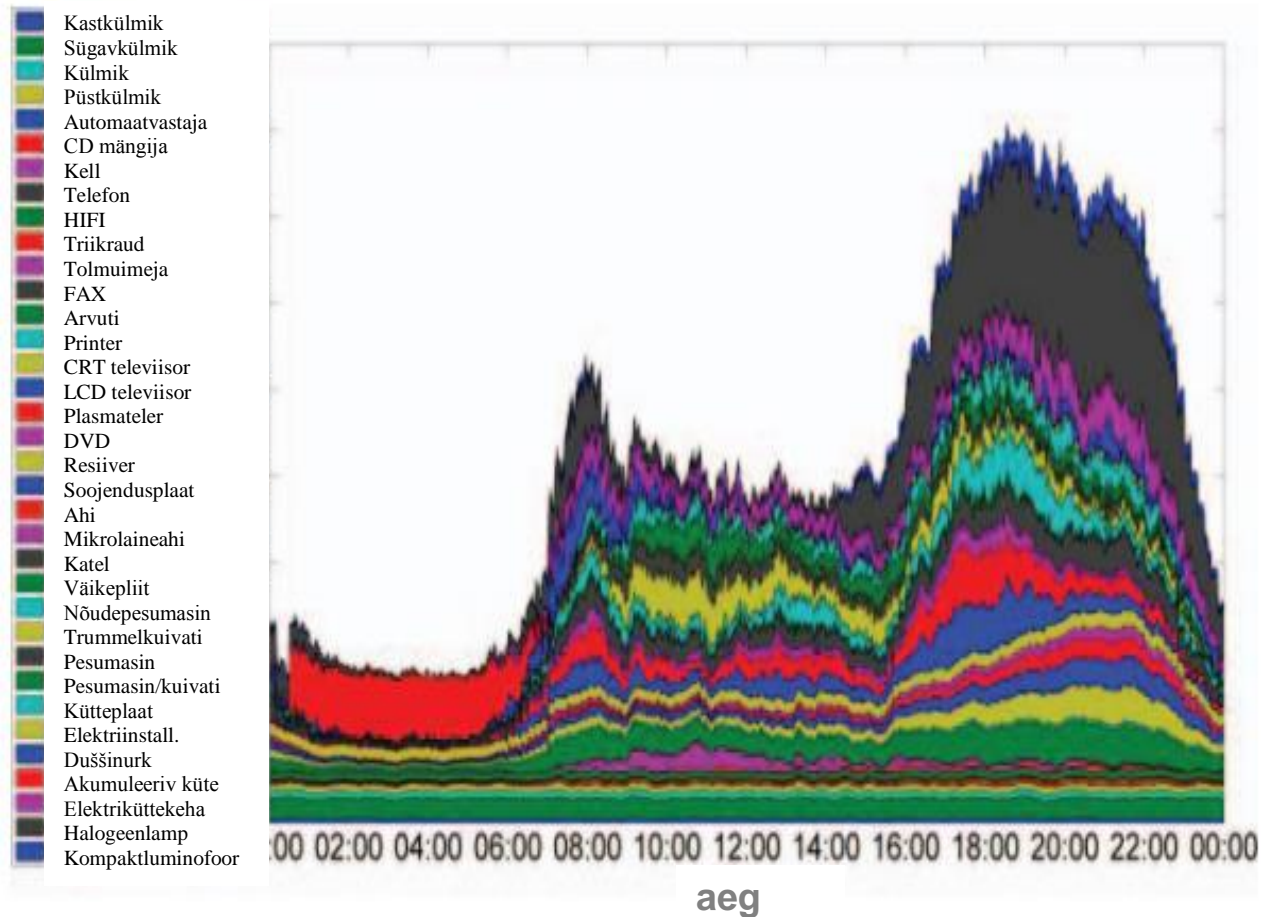
- klass 1 – kodu (eramud, korterelamud, suvilad, abihooned jms)
- klass 2 – põllumajandus (karjakasvatus, taimekasvatus, kalandus jms)
- klass 3 – äri ja avalik (koolid, äri, kontorid, kaubandus, teenindus, tervishoid jms)
- klass 4 – tööstus (mitmesugused tootmisettevõtted, transport, kaevandused jms)
- klass 5 – elektrijaamade omatarve
 - alamklass 51 – väikekoostootmisjaamade (CHP) omatarve
 - alamklass 52 – suurte soojuselektrijaamade omatarve

Iga koormusklass sisaldab mingeid tüüpilisi tarbimisseadmeid e koormuskomponente. Koormusklassi sageduskarakteristikud kujunevad vastavalt koormusklassides sisalduvatele koormuskomponentidele ja nende osakaaludele. On selge, et koormuskomponentide osakaalud mingis koormusklassis on ajas pidevalt muutuvad suurused. Joonisel 5.1 on näide kodukoormuse komponentide osakaalude ööpäevasest muutumisest.

Koormuskomponentide osakaalude muutuste (ööpäevaste, nädalaste ja sesoonsete muutuste) kirjeldamiseks ja arvestamiseks vajalikke andmeid ei ole üldjuhul saada. Seepärast on antud töös

piirdatud osakaalude aastakeskmiste suurustega. Vaid kodukoormuse kohta õnnestus leida komponentide keskmised osakaalud eraldi suviseks ja talviseks perioodiks.

Vastavalt sellele on võimalik leida koormusklasside sageduskarakteristikuid aasta keskmiste suurustena eraldi aktiiv- ja reaktiivkoormuste jaoks. Vaid kodukoormusklassi jaoks saab neid sagedussõltuvusi leida eraldi suviseks ja talviseks perioodiks.

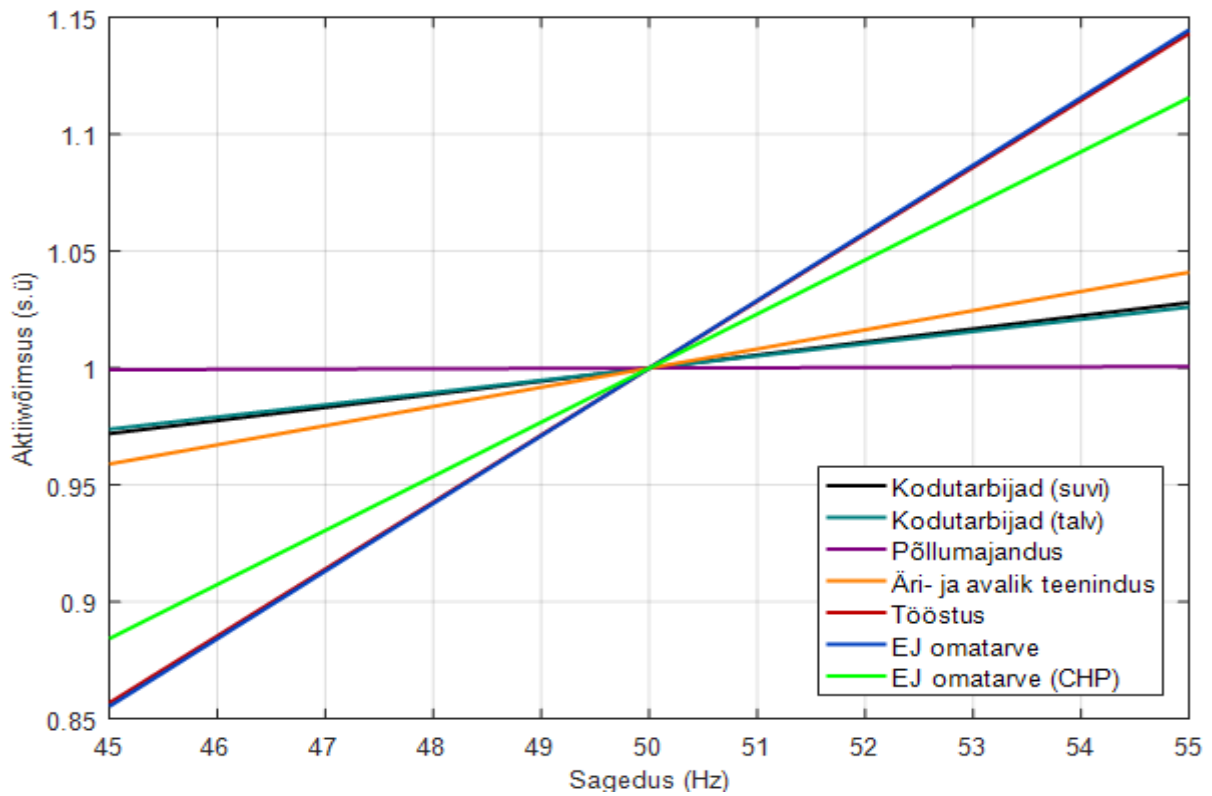


Joonis 5.1. Kodukoormuse koormuskomponentide osakaal ööpäevases koormusgraafikus [14].

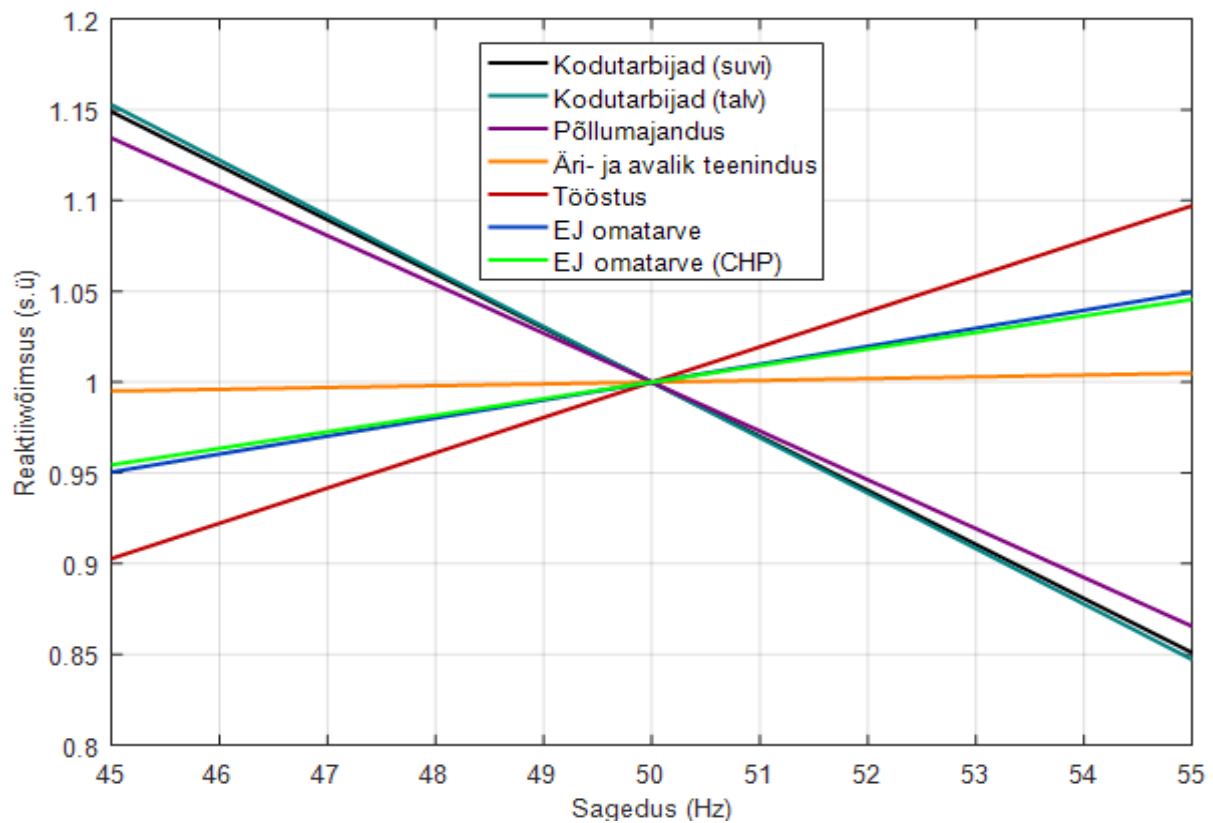
Kui koormusklassi kuuluvate koormuskomponentide aktiiv- ja reaktiivkoormuste osakaalud on teada, saab koormuskomponentide sageduskarakteristikute (5.1) ja (5.2) alusel leida kogu koormusklassi aktiiv- ja reaktiivkoormuse sageduskarakteristikud.

Kui tähistada koormuskomponentide osakaalud aktiivkoormuste järgi vastavalt komponentide numbritele alaindeksiga k ja vastavalt koormusklasside numbritele alaindeksiga i , ehk siis C_{pki} ja reaktiivkoormuste järgi vastavalt C_{qki} , siis avaldub i -nda koormusklassi aktiivkoormuse sagedustundlikkus valemiga

Koormusklasside sagedussõltuvuste graafikud on joonistel 5.2 ja 5.3.



Joonis 5.2. Koormusklasside aktiivvõimsuse sagedusarakteristikud.



Joonis 5.3. Koormusklasside reaktiivvõimsuse sagedusarakteristikud.

5.4 Koormussõlmede staatilised sageduskarakteristikud

Vastavalt komponentidepõhisele meetodile on koormussõlmede sageduskarakteristikute leidmisel aluseks koormusklasside sageduskarakteristikud ja koormusklasside koormuste osakaalud koormussõlmedesse agregeeritud summaarsest koormusest. Koormusklasside sageduskarakteristikud on jaotises 5.3 leitud eraldi aktiiv- ja reaktiivkoormuste jaoks ning kodukoormuste puhul eraldi suviseks ja talviseks perioodiks. Koormusklasside osakaalud on Elektrilevi OÜ varustuspiirkonna sõlmedes kindlaks määratud Elektrilevi OÜ tarbimisandmete alusel. Muude ettevõtete varustuspiirkondade koormussõlmede jaoks vajalikud andmed koormusklasside koosseisude kohta üldjuhul puudusid ning seal on koormusklasside koosseis ja osakaalud tuletatud üldise teabe ja sõlmede tarbimisstruktuuride sarnasuse analüüsi abil. Lõpptulemusena on leitud kõikidele põhivõrgu 110 kV koormussõlmedele koormusklasside koosseis ja osakaalud eraldi suviseks ja talviseks perioodiks.

Vaadeldud koormusklasse on kirjeldatud jaotises 5.3.

Ka sõlmekoormuste sagedussõltuvuste leidmisel on tehtud kaks olulist lihtsustust:

- jäetud arvestamata pinge muutustega ning loetud pinge konstantseks ja võrdseks nimipingega: $U = U_n = U_0$;
- aktiiv- ja reaktiivkoormuste sagedussõltuvused on kirjeldatud lineaarsete funktsioonidena.

Nende lihtsustuste tulemusel saavad sõlmekoormuste sagedussõltuvuse mudelid järgmise lineaarse kuju:

Lineariseerimine on põhjendatud sageduse suhtelise stabiilsusega ja sageduse kõrvalekallete väikese ulatusega. Selle tõttu võib sageduskarakteristiku nimisageduse ümbruses lineariseerida.

Kui sõlme agregeeritud koormusklasside aktiiv- ja reaktiivvõimsuste osakaalud on teada, saab koormusklasside sageduskarakteristikute alusel leida sõlme agregeeritud summaarse aktiiv- ja reaktiivkoormuse sageduskarakteristikud.

Kui tähistada mingi i -nda koormusklassi osakaalu mingis j -ndas sõlmes aktiivvõimsuse järgi C_{pij} ja reaktiivvõimsuse järgi vastavalt C_{qij} , siis avaldub sõlme j agregeeritud aktiivkoormuse sagedustundlikkus valemiga

Koormussõlmede sagedussõltuvuste sesoonse muutlikkuse arvestamiseks on leitud eraldi tegurid suveks ja talveks, kasutades suvele ja talvele vastavaid koormusklasside osakaalusid ning kodukoormuste jaoks ka suvel ja talvel erinevaid sagedustundlikkuse tegureid.

Koormusklasside osakaalud sõlmedes on toodud lisas tabelis L1. Näiteks on tabeli fragment esitatud tabelina 5.12.

Koormussõlmede sagedustundlikkuse tegurid on lisas tabelis L5. Näiteks on tabeli fragment esitatud tabelina 5.13.

5.5 Kokkuvõte

Viiendas peatükis käsitleti sõlmekoormuste staatiliste sageduskarakteristikute leidmist komponentidepõhisel meetodil alustades koormuskomponentide aktiiv- ja reaktiivkoormuste sagedustundlikkuste määramisest kuni sõlmekoormuste sageduskarakteristikute leidmiseni. Kasutati lineaarseid sageduskarakteristikute mudeleid. Koormuskomponentide sageduskarakteristikud leiti kirjandusallikate kriitilise analüüsi teel. Iseloomustati erinevate sagedussõltuvustega koormuskomponentide rühmi. Koormusklasside sageduskarakteristikute leidmiseks kasutati 2. peatükis leitud koormuskomponentide osakaalusid koormusklassides. Sealjuures õnnestus kodukoormusele määrata eraldi suvised ja talvised koormuskomponentide osakaalud. Muudele koormusklassidele võeti seoses andmete puudumisega aasta keskmised komponentide osakaalud. Nimetatud andmete alusel arvutati välja koormusklasside sagedustundlikkused. Koormusklasside osakaalud sõlmedes määrati oluliselt kindlaks juba varasematel etappidel Elektrilevi OÜ andmete alusel. Muude kui Elektrilevi OÜ võrgupiirkondade jaoks, nagu VKG ja Imatra Elekter AS leidis vaid kaudseid andmeid sõlmede koormusklasside koosseisu ja osakaalude määramiseks ning nendele sõlmedele määrati osakaalud ligikaudselt, kasutades sealjuures ka teavet sõlmekoormuste sarnasuse kohta. Lisati ka elektrijaamade omatarbe koormusklass eraldi suurte elektrijaamade ja väikeste koostootmisjaamade jaoks (vt lisa L.5.). Koormusklasside sageduskarakteristikute ja osakaalude alusel leiti kõikidele 110 kV sõlmede aktiiv- ja reaktiivkoormustele sagedussõltuvusi iseloomustavad tegurid eraldi suviste ja talviste perioodide jaoks.

5.6 Kasutatud kirjandus

- [1] Cresswell, C. *Advanced Load Modelling for Power System Studies*. The University of Edinburgh, 2013, 321 pp.
- [2] Fraunhofer-Institute for Systems and Innovation Research. *Study on the Energy Savings Potentials in EU Member States, Candidate Countries and EEA Countries Final Report*. European Commission Directorate-General Energy and Transport, 2009.
- [3] Palm, S., Schegner, P. "Static and Transient Load Models Taking Account Voltage and Frequency Dependence," in *Power Systems Computation Conference*, 2016.
- [4] Kao, W.-S. "The Effect of Load Models on Unstable Low-Frequency Oscillation Damping in Taipower System Experience w/wo Power System Stabilizers," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 3, 2001, pp. 463-472.

- [5] Concordia, C., Ihara, S. "Load Representation in Power System Stability Studies," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, no. 4, 1982.
- [6] Sedighizadeh, M., Rezazadeh, A. "Load Modeling for Power Flow and Transient Stability Computer Studies at BAKHTAR Network," *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, vol. I, 2007.
- [7] Allen, E. H., Ilic, M. D. "Interaction of transmission network and load phasor dynamics in electric power systems," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 47, no. 11, 2000, pp. 1613–1620.
- [8] Hamadani, H., Wang, L., Morison, K. "Practical Issues in Load Modeling for Voltage Stability Studies," in *Power Engineering Society General Meeting*, 2003, pp. 1392-1397.
- [9] Kundur, P. *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [10] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic, "Standard Load Models For Power Flow and Dynamic Performance Simulation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, 1995, pp. 1302-1313.
- [11] Achammer, J., Iwamoto, H., Iwasaki, M., Donlon, J. "Power Modules for appliance motor control," *IEEE Industry Applications Magazine*, 2002.
- [12] Bartos, F. ABB hosts technology day in Sweden. *Control Engineering*, 2004.
- [13] Pijnenburg, P. Non-Intrusive Load Modeling Using Newton-Phaselet Frames. University of New Brunswick, 2015.
- [14] IEEE Task Force. Load representation for dynamic performance analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. VIII, no. 2, 1993, pp. 472-482,.
- [15] Ballanti, A., Ochoa, L. F. Initial Assessment of Voltage-Led Demand Response from UK Residential Loads. 2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), Washington, DC, February 2015, pp. 1-5.
- [16] Sorts, S. Eesti elektrisüsteemi põhivõrgu sõlmekoormuste sagedussõltuvuste uurimine. Magistritöö. TTÜ elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut, 2017, 98 lk.

6 Kokkuvõte

Projekti eesmärgiks oli selgitada Eesti 110 kV võrgu sõlmekoormuste käitumist pinge ja sageduse muutuste korral ja leida sõlmekoormuste käitumist kirjeldavad staatilised ning dünaamilised karakteristikud nii aktiiv- kui ka reaktiivkoormustele. Tingimuseks oli, et karakteristikuid kirjeldavad mudelid peavad olema kasutatavad programmides PSCAD ja PSS/E. Töö peamiseks lõpptulemuseks oli ette nähtud 110 kV võrgu ca 200 koormussõlmele pinge- ja sagedussõltuvusi kirjeldavatele mudelitele sobiva kuju ning adekvaatsete pinge- ja sagedustundlikkuse tegurite määramine nii aktiiv- kui ka reaktiivkoormuste jaoks.

Kirjandusallikate analüüsi tulemusel selgus, et selle teemalisi uuringuid on küll tehtud, kuid mitte väga arvukalt ja saadud tulemused on leidnud rakendamist kas suhteliselt kitsas valdkonnas või ei ole eriti usaldusväärsed kohandamiseks neid Eesti 110 kV võrgu sõlmekoormustele. Selle tulemusel sisaldas käesolev projekt nii võimalike lahenduste otsinguid kui ka katseid erinevaid lähenemisviise rakendada, et selgitada välja reaalsed ja võimalikult adekvaatsed lahendused.

Koormuskarakteristikute modelleerimisel on kasutatud kahte üldist lähenemisviisi:

- mõõteandmetel põhinevad meetodid
- koormuskoosseisude uurimisel põhinev meetod e komponentidepõhine meetod

Mõõteandmetel põhinevate meetodite puhul on kasutatud järgmisi andmeid:

- SCADA statistiliste mõõteandmete (aegridade) analüüs koormuse matemaatilise mudeli abil
- rikkesalvestite andmetel põhinev analüüs
- aktiivsete katsete mõõtmistulemustel põhinev analüüs

Koormuskoosseisude uurimisel põhineva meetodi e komponentidepõhise meetodi rakendamisel olid põhitegevused järgmised:

- tarbimise struktuuris iseloomulike elektriseadmete e koormuskomponentide kindlakstegemine
- koormuskomponentide aktiiv- ja reaktiivkoormuste pinge- ja sagedussõltuvuste kindlakstegemine
- koormuskomponentide koosseisude uurimine ja osakaalude kindlakstegemine iseloomulikes koormusklassides

- eelneva alusel koormusklasside aktiiv- ja reaktiivkoormuste pinge- ja sagedussõltuvuste kindlakstegemine
- uuritavatesse koormussõlmedesse agregeeritud koormusklasside ja nende osakaalude kindlakstegemine
- eelneva alusel sõlmekoormuste pinge- ja sagedussõltuvuste mudelitele adekvaatsete tegurite leidmine.

Pinge- ja sagedussõltuvuste ajalist muutlikkust on arvestatud vastavalt selleks vajalike lähteandmete kättesaadavusele, mille tõttu on käesolevas uurimistöös lõpptulemustes arvestatud vaid sesoonsete muutustega. Nädalaste ja ööpäevaste muutuste arvestamine eeldab täiendavate andmete saamist tulevikus.

Uurimistöös varasemate etappide peamised tegevused ja tulemused

- on täiustatud koormuse matemaatilist mudelit pinge ja sagedussõltuvuste uurimise eesmärgil;
- koormuse matemaatilise mudeli abil on modelleeritud ja uuritud koormusi ja pingening sagedussõltuvusi alajaamade koormustega SCADA andmete alusel;
- on selgunud, et statistilistel aegridadel põhineva matemaatilise mudeli abil ei õnnestuka pärast temperatuurimõjude neutraliseerimist tuvastada usaldatavaid korrelatiivseid seoseid pinge ja sageduse ning aktiiv- ja reaktiivkoormuste vahel pinge ja sageduse olulise konstantsuse tõttu;
- on määratletud koormussõlmedesse agregeeritud koormuste koosseisus esinevad koormusklassid ja tehtud kindlaks koormusklasside osakaalud ning nende sesoonne muutlikkus kõikide Elektrilevi OÜ jaotusvõrku toitvate 110 kV sõlmede jaoks;
- vastavalt koormusklasside koosseisule on moodustatud 10 sarnaste koormussõlmede gruppi kasutades K-keskmiste klasterdamise algoritmi ning tuvastatud igas grupis iseloomulik e nn esindussõlm;
- on uuritud ja tuvastatud kolme koormusklassi: kodu, äri- ja avaliku sektori tüüpilised tarbimisseadmete koosseisud ning kirjeldatud koosseisude ajalist muutlikkust;
- koormusklassidele on kirjandusallikate analüüsi alusel leitud koormusklasside sagedustundlikkuse tegurid aktiiv- ja reaktiivkoormustele;
- kodutarbijate iseloomulikele koormuskomponentidele on loodud mudelid PSCAD tarkvaras ning määratletud staatilised pingekarakteristikud;

- koormusklasside sagedussõltuvuste ning osakaalude alusel on leitud 10 esinduskoormuse jaoks agregeeritud aktiiv- ja reaktiivkoormuste sagedussõltuvuste staatilised karakteristikud suvel ja talvel. Esinduskoormuste sageduskarakteristikute järgi saab modelleerida sagedussõltuvusi kõikidele teistele esinduskoormuse klastrisse kuuluvatele sõlmede;
- on tehtud kindlaks erinevat liiki hajatootmiseadmete omadused ja käitumine lühiste ning pingelohkude korral ja analüüsitud Eesti elektrisüsteemi ühendatud hajatootjaid liikide alusel ning määratletud nende osakaal sõlmedes agregeeritud koormuste suhtes;
- on tuvastatud, et koormuskarakteristikute leidmisel tuleb agregeeritud koormusest välja arvata keskpingevõrku ühendatud (suured) hajatootmiseadmed. Väikese võimsusega tootmiseadmed võivad jääda agregeeritud koormuse hulka ja neid ei ole vaja eraldi käsitleda;
- on uuritud ja kirjeldatud seadmete pingest sõltuvat iseeneslikku väljalülitumist;
- on kirjeldatud ja uuritud otsetoitega asünkroonmootori mudelit PSCAD tarkvaras;
- mõõtmistepõhiseks koormuskarakteristikute määramiseks aktiivsete katsete abil on määratletud sobivad pingehälbed ja mõõteseadmetele esitatavad tehnilised nõuded ning tuvastatud elektrivõrkudes kasutatavad nõuetele vastavad mõõteseadmeh;
- aktiivsete katsete tegemiseks on välja töötatud metoodika mõõdetavate sõlmede valikuks ning esitatud katsekava koormuste staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute määramiseks;
- pingehäiringute andmete kasutatavuse osas tuvastati koormuskarakteristikute määramiseks sobivate pingehäiringute tehnilised parameetrid (jääkpinge, häiringu kestvus, pingeasümmeetria) ja määrati kindlaks mõõteseadmetele esitatavad nõuded ning tuvastati elektrivõrkudes paiknevad seadmed, mis vastavad esitatud nõuetele. mõõteseadmeh analüüsi käigus selgus, et kvaliteedianalüsaatorid ja häiresalvestid vastavad enamikule esitatavatest nõuetest;
- on tuvastatud, et PSCAD tarkvara eksponentsiaalse koormusmudeli (*Fixed Load*) kasutamisel lühise olukorras esinevad teatud juhtumitel koormuskõveral tegelikkusele mittevastavad võnkumised, mille summutamiseks tuleb koormusmudeli ette lisada aktiivtakistus kas elemendi *Resistor* või liinimudeli kujul, aktiivtakistuse vajaliku suuruse määramiseks on välja töötatud algoritm.

Uurimistöö käesoleva etapi peamised tulemused

Käesolev etapp on projekti lõppetapp, mille peamiseks tulemuseks on kõikidele 110 kV võrgu sõlmekoormustele pinge- ja sageduskarakteristikute leidmine. Peamised tulemused on järgmised:

- uurimistöö tulemusel on kindlaks tehtud iseloomulikud tarbimisseadmed e koormuskomponendid;
- koormuskomponentidele on peamiselt kirjanduse alusel kindlaks määratud pinge- ja sagedussõltuvuste tegurid;
- koormusklasside jaoks on kindlaks määratud iseloomulikud koormuskomponentide koosseisud ja osakaalud;
- koormuskomponentide osakaalud on kodu koormusklassi jaoks leitud nii suviseks kui ka talviseks perioodiks. Ülejäänud koormusklassidele on võetud aasta keskmised koormuskomponentide osakaalud seoses vajalike lähteandmete puudumisega;
- võrreldes eelneva etapiga võeti sarnasuse alusel kokku äri- ja avaliku teeninduse klassid.
- lisati uueks koormusklassiks elektrijaamade omatarve ja leiti koormuskomponentide osakaalud eraldi suurte elektrijaamade ja väikeste koostootmisjaamade jaoks;
- on välja töötatud staatiliste pingekarakteristikute summeerimise meetodika, mille abil on võimalik summeerida koormuskomponentide karakteristikuid lähtudes koormuskomponentide osakaaludest, et määrata koormusklasside pingekarakteristikud. Samuti saab sama meetodikat kasutades summeerida koormusklasside karakteristikud, et tuvastada sõlmekoormuste pingekarakteristikud;
- summeerimisel kasutatav koormusmudel on paindlikum ning eeldatavasti ka täpsem kui harilik ZIP või eksponentmudel, kuid võrguarvutustarkvarades rakendamiseks ebasobivas vormis, seetõttu on välja töötatud meetodika koormuste pingetundlikkust kirjeldavate mudelite parameetrite teisendamiseks ühelt mudelikujult teisele. Samuti uuriti PSSE ja PSCAD koormusmudelite teisendamise täpsust lähtuvalt võrdlevast modelleerimisest. Ilmnes, et suurima veaga on suure negatiivse pingetundlikkusega koormusmudelite teisendus;
- sageduskarakteristikud on vastavalt PSCAD ja PSS/E tarkvarades kasutatavatele mudelitele lineaarsed ja nende summeerimisel raskusi ei esine;
- koormuskomponentidele pinge- ja sageduskarakteristikud on leitud üldiselt kirjandusallikate kriitilise analüüsi tulemusel;

- vastavalt koormuskomponentide pinge- ja sageduskarakteristikutele ja osakaaludele koormusklassides on leitud koormusklassidele iseloomulikud pinge- ja sageduskarakteristikud;
- komponentidepõhisel meetodil määratud tööstuse ja väikeste koostootmisjaamade omatarbe koormusklassi pingekarakteristikute osas tuvastati sarnasus ning mõningane erinevus võrreldes elektriyaamade omatarbega;
- VKG ja Imatra Elekter AS jaotusvõrgupiirkondade 110 kV alajaamade koormuste osas on leitud koormusklasside osakaalud sõlmedes kaudsete andmete ja eksperthinnangute alusel;
- koormusklasside pinge- ja sageduskarakteristikute ning osakaalude alusel on leitud kõikide 110 kV võrgu sõlmedesse agregeeritud koormustele staatilised pinge- ja sageduskarakteristikud aktiiv- ja reaktiivkoormuste jaoks eraldi nii suviseks kui ka talviseks perioodiks, mida teatud mõõndusega saab kasutada ka dünaamiliste protsesside korral. Tulemused on toodud lisades olevates tabelites;
- pingekarakteristikute parameetrite väärtuste katselisel määramisel tuvastati mitmel juhtumil parameetrite väärtuste sarnasus komponentidepõhisel meetodil saadud väärtustega.

Võimalikud uurimisteemad tulevikus

- koormuskomponentide ja koormusklasside osakaalude ööpäevaste ja nädalaste muutlikkuste uurimine lähtudes küsitlusandmetest, suuremahulistest mõõtmistest ning kliendiandmebaasidest;
- sõlmekoormuste pingekarakteristikute täpsustamine aktiivsete katsetega mitmetes sõlmedes, nt tüüpkoormussõlmedes või suurima modelleerimisveaga sõlmedes;
- sõlmekoormuste sagedustundlikkuse uurimine kõrgemate pingeharmonikute olemasolul;
- sagedustundlikkuse puhul tekkiva võnkeprotsessi täpsem uurimine ning analüüsi meetodika täpsustamine;
- faasikoormusmudeli võnkeprotsesside täpsem uurimine ning võngete summutamise võimaluste analüüs pikemate lühisetalitluste puhul;
- tüüpiliste koormuskomponentide modelleerimine ja pinge- ning sagedussõltuvuste uurimine PSCAD mudelite abil;
- häiringusalvestite kasutamisevõimaluste uurimine sõlmekoormuste dünaamiliste karakteristikute leidmiseks;

- dünaamilise koormusmudeli parameetrite määramise metoodika väljatöötamine;
- laiseiresüsteemipõhise koormusmodelite seirerakenduse arendusvõimaluste analüüs;
- aktiivsete mikrovõrkude modelleerimine pinge- ja sageduskarakteristikute leidmiseks