



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**ELEKTRIAUTODE LAADIMISE MÕJU
MADALPINGEVÕRGU ÜHEAEGSUSTEGURI
MÄÄRAMISELE LINNALÄHEDASES
UUSELAMURAJOONIS**

**THE IMPACT OF ELECTRIC VEHICLE CHARGING ON THE
LOW-VOLTAGE GRID COINCIDENCE FACTOR IN A
SUBURBAN NEW RESIDENTIAL AREA**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Hindrek Pulk

Üliõpilaskood: 211575AAAM

Juhendaja: Vahur Maask, teadur

Kaasjuhendaja: Victor Astapov, teadur

Tallinn 2024

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad,

kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 20.....

Autor: Hindrek Pulk

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Hindrek Pulk

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose, Elektriautode laadimise mõju madalpingevõrgu üheaegsusteguri määramisele linnalähedases uuselamurajoonis, mille juhendajad on teadur Vahur Maask ja teadur Victor Astapov.

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

13.05.2024

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Hindrek Pulk, 211575AAAM
Õppekava, peeriala: AAAM, Energiamuundus- ja juhtimissüsteemid
Juhendaja(d): Vahur Maask, teadur, 6203703; Victor Astapov, teadur
Konsultant: Argo Rosin, professor

Lõputöö teema:

Elektriautode laadimise mõju madalpingevõrgu üheaegsusteguri määramisele linnalähedases uuslamurajoonis

The impact of electric vehicle charging on the low-voltage grid coincidence factor in a suburban new residential area

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Hinnata elektriautode laadimise mõju madalpingevõrgu üheaegsustegurile
2. Töötada välja linnalähedasele piirkonnale üheaegsusteguri planeerimise meetod
3. Teha ettepanekuid üheaegsusteguri määramiseks vaadeldavas piirkonnas elektriautode lisandumise korral võrku

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse läbi töötamine	01.01.2024
2.	Andmete kogumine	31.01.2024
3.	Andmete analüüs	29.02.2024
4.	Teoreetilise osa kirjutamine	01.04.2024
5.	Kokkuvõte	15.04.2024
6.	Töö esmane versioon juhendajale saatmiseks	15.04.2024
7.	Paranduste sisseviimine	25.04.2024
8.	Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine	30.04.2024
9.	Töö lõplik versioon valmis	10.05.2024

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "13"mai 2024 a

Üliõpilane: Hindrek Pulk ".....".....20.....a
/allkiri/
Juhendaja: Vahur Maask ".....".....20.....a
/allkiri/
Kaasjuhendaja: Victor Astapov ".....".....20.....a
/allkiri/
Programmijuht: Toomas Vaimann ".....".....20.....a
/allkiri

SISUKORD

EESSÕNA	7
Lühendite ja tähiste loetelu	8
1. SISSEJUHATUS.....	9
2. ÜHEAEGSUSTEGURI OLEMUS	11
2.1 Põhilised mõisted	11
2.2 Üheaegsusteguri erinevad lähenemisviisid	12
2.2.1 Herman-Beta jaotus.....	12
2.2.2 Velanderi valem või Strand-Axelssoni valem	13
2.2.3 Normaalkaotus.....	13
2.3 Üheaegsusteguri elektrivõrgu planeerimisel	14
2.3.1 Üheaegsusteguri arvutamine madalpingevõrgus	15
2.3.2 Üheaegsusteguri määramise erinevad lähenemisviisid madalpingevõrgus	16
3. SISERIIKLIKE JA RAHVUSVAHELISTE ARENGUKAVADE JA REGULATSIOONIDE ANALÜÜS	18
3.1 Euroopa Liidu energiasektori eesmärgid aastani 2050.....	18
3.1.1 Uute sõiduautode ja uute väikeste tarbesõidukite CO ₂ -heite normid	18
3.1.2 Alternatiivkütuste taristu kasutuselevõtt.....	19
3.2 Eesti energiasüsteemi eesmärgid ja prognoos aastani 2050	20
3.2.1 Eesti elektritarbimise prognoos.....	20
3.2.2 Eesti elektrivõrgu areng ja eesmärgid	22
4. ELEKTRITARBIMISE JA -TOOTMISE MUUTUSTE MÕJU ÜHEAEGSUSTEGURILE VÕRGUS	24
4.1 Soojuspumpade mõju.....	25
4.2 Päikesepaneelide ja akusalvestuse mõju	27
4.3 Elektriautode mõju.....	28
4.3.1 Kaasnevad probleemid elektriautode lisandumisel võrku	28
4.3.2 Elektrisõidukite reaalse üheaegsusteguri määratlemine	28
4.3.3 Mõju madalpingevõrgule.....	34
5. STSENAARIUMID ÜHEAEGSUSTEGURI MÄÄRAMISEKS	35
5.1 Stsenaarium 1	35
5.2 Stsenaarium 2.....	37
5.3 Stsenaarium 3.....	38
6. VADELDAVA PIIRKONNA MODELLEERIMINE VALITUD STSENAARIUMITE ALUSEL	40
6.1 Vaadeldava piirkonna kirjeldus	40
6.2 Mudeli koostamine	41

6.2.1	Madalpingevõrgu modelleerimine DIgSILENT PowerFactory tarkvaraga	43
6.2.2	Elektriauto kirjeldamine tarkvaras	43
6.3	Elektriauto laadimise simuleerimine valitud piirkonnas.....	44
6.3.1	Alajaama üheaegsusteguri leidmine	44
6.3.2	Fiidri üheaegsusteguri leidmine	45
6.3.3	Stsenaariumi 1 tulemused	46
6.3.4	Stsenaariumi 2 tulemused	50
6.3.5	Stsenaarium 3 tulemused	52
7.	VÕRDLEV ANALÜÜS JA JÄRELDUSED	55
7.1	Loodud meetodi kirjeldus.....	55
7.2	Simulatsioonide tulemuste analüüs ja järeldused	56
7.2.1	3,7kW ja 11kW laadijate mõju	56
7.2.2	Elektriautode mõju erineva sõidukite koguse korral.....	59
7.3	Soovitused uue madalpingevõrgu planeerimisel	62
	KOKKUVÕTE	64
	SUMMARY.....	66
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	68
	Lisa 1 Võrgu elektriskeem koos elektriautodega DigSilent PowerFactory tarkvaras	71

EESSÕNA

Lõputöö idee tuleneb Elektrilevi OÜ poolt tellitud soovist välja selgitada, kuidas muutuvad elektrienergia tarbimisel koormusgraafikud ja üheaegsustegur sõltuvalt hajatootmis- ja salvestusseadmete, elektriautode ning soojuspumpade lisandumisest kodu- ja äritarbijate segmendis. Sellest tulenevalt pakkus Argo Rosin välja antud teema ühe osana uurida elektriautode mõju üheaegsustegurile madalpingevõrgus. Lõputööd juhendas Vahur Maask, lisaks abistas DigSilent PowerFactory tarkvara hankimisel ja programmiga seotud probleemide lahendamisel Victor Astapov. Tänan kõiki eelpool nimetatuid heade ideede ja ladusa koostöö eest. Samuti tänan Kaspar Roosilehte, kellega koostöös sai nii mõnelegi probleemile kiiremini vastus leitud.

Käesoleva töö eesmärgiks on hinnata elektriautode laadimise mõju üheaegsustegurile madalpingevõrgus ning töötada välja linnalähedasele piirkonnale üheaegsusteguri planeerimise meetod, kasutades modelleerimistarkvara DigSilent PowerFactory. Eesti suurimas jaotusvõrguettevõttes Elektrilevi OÜ elektrivõrgu planeerimisel kasutusel olevad üheaegsustegurid on määratud aastakümneid tagasi tehtud andmete põhjal ja tulenevalt tarbimis- ja tootmismustrite muutustest ei vasta need enam tegelikkusele. Seetõttu on oluline aru saada, kuidas vastavalt riiklikele arengukavadele ja regulatsioonidele üha kiiremini lisanduv hulk uusi energia tarbimis- ja tootmiseseadmeid tarbimismustreid ja seeläbi üheaegsustegureid muutma hakkab.

Töös luuakse arengukavadele ja teadusartiklitele tuginedes kolm stsenaariumit, milles uuritakse, kuidas erinev lisanduv elektriautode arv ja laadimisvõimsus võrgu üheaegsustegurit mõjutab. Olukordade simuleerimisel ja üheaegsustegurite arvutamisel kasutati ühe madalpingevõrgu jaotusalajaama reaalseid tunnipõhiseid tarbimisandmeid.

Tulemustest selgus, et kui lisada vaadeldavas võrgus pooltele tarbijatele elektriauto, siis suurendab see kohati rohkem kui kaks korda alajaama ja fiidrite üheaegsustegureid. Siinkohal on oluline märkida, et tulemuste simuleerimisel olukorras, kus tarbijad laevad oma sõidukeid üheaegselt, on võrgu üheaegsustegurile mõju oluliselt suurem, kui olukordades, kus on arvestatud tarbijate erinevat laadimise aega. Antud töö tulemustest lähtuvalt tuleks võrku lisanduvate elektrisõidukite korral arvestada madalpingevõrgu planeerimisel suureneva üheaegsusteguriga.

üheaegsustegur, elektriauto, madalpingevõrk, magistrিতöö

Lühendite ja tähiste loetelu

EL – Euroopa Liit

ELV – Elektrilevi OÜ

EV – elektriauto

HP - soojuspump

k_{AJ} – alajaama üheaegsustegur

k_F – fiidri üheaegsustegur

KP - keskpinge

MP - madalpinge

$P_{\max AJ}$ – üheaegne suurim tarbimisvõimsus alajaamas

$P_{\max F}$ – üheaegne suurim tarbimisvõimsus fiidril

$P_{\max LP}$ – liitumispunktide summeeritud maksimaalne tunnitarbimine

PV – päikesepaneel

QSD - Quasi-Dynamic Simulation

SOC – elektriauto aku laetuse tase

1. SISSEJUHATUS

Ühiskonnas vastu võetud kliimaeesmärkide saavutamiseks on üheks võtmetähtsusega tegevuseks fossiilsete kütuste asendamine taastuvate energiaallikatega. Hetkel laialt levinud sise põlemismootoriga sõidukid asendatakse elektrimootoriga alternatiivide vastu, üha enam võetakse kasutusse tuule- ja päikeseelektrijaamasid, samuti erinevaid elektrisalvestussüsteeme ja efektiivsemaid kütteseadmeid. Nende elektritarbimis- ja tootmisseedmete lisandumine seab elektrivõrkudele mitmeid väljakutseid.

Elektrivõrgu planeerijate/süsteemi operaatorite jaoks on oluline mõista, kuidas lisanduvad tootmis- ja tarbimisseadmed nende hallatavaid võrke omakorda mõjutama hakkavad. Hoidmaks ära elektrivõrgu seadmete üle- või aladimensioneerimist tuleb osata hinnata, milliseid elektrikoormuse tippe vaadeldavas elektrivõrgu punktis võib esineda. Elektrivõrku kuulub mitmeid erineva tarbimismustriga kliente. Hindamiseks tarbijate koormustippude üheaegse esinemise tõenäosust kasutatakse võrgu planeerimisel üheaegsustegurit. Üheaegsusteguri all mõistetakse üheaegselt esinevate tarbijate grupi maksimaalse tarbimise suhet nende individuaalsete maksimaalsete tarbimiste summasse. Lisanduvate elektritootmis- ja tarbimisseadmete näol aga hetkel kasutatavad üheaegsustegurid enam ei kehti ja tuleb määrata vastavalt muutustele uued.

Käesolevas töö eesmärgiks on hinnata elektriautode laadimise mõju üheaegsustegurile madalpingevõrgus ning töötada välja linnalähedasele piirkonnale üheaegsusteguri planeerimise meetod, kasutades modelleerimistarkvara DigSilent PowerFactory. Teema on oluline, kuna hetkel Eesti suurimas jaotusvõrguettevõttes Elektrilevi OÜ elektrivõrgu planeerimisel kasutusel olevad üheaegsustegurid on määratud aastakümneid tagasi tehtud andmete põhjal ja tulenevalt tarbimis- ja tootmismustrite muutustest ei vasta need enam tegelikkusele.

Töö teises peatükis kirjeldatakse üheaegsusteguri olemust. Kohati võib üheaegsusteguri mõistet segamini ajada teiste sarnaste levinud mõistetega, mistõttu on oluline eelnevalt defineerida, kuidas madalpingevõrkudes ja seega antud töös üheaegsustegurit mõistetakse. Peatükis kirjeldatakse üheaegsusteguri erinevaid lähenemisviise ja tuuakse välja, kuidas madalpingevõrkudes käsitletakse erinevate allikate näitel üheaegsustegurit.

Kolmandas peatükis on vaatluse all siseriiklikud ja rahvusvahelised arengukavad ja regulatsioonid, kus kirjeldatakse, kuhu energeetika sektor laiemalt teel on ja mida seetõttu antud töös tähele tuleb panna, seda eelkõige elektrisõidukite vaatenurgast.

Neljandas peatükis tuuakse välja suuremad elektritarbimis- ja tootmiseadmed, mis tulevikus aina rohkem tarbijate koormusgraafikuid muutma hakkavad ja sellega seoses elektrivõrgu üheaegsustegurile mõju avaldavad. Põhiliselt keskendutakse tulenevalt töö teemast elektriautodele, kuid põgusalt antakse ülevaade ka soojuspumpade, päiksepaneelide ja akusalvestuse mõjust võrgu üheaegsustegurile.

Viiendas peatükis kirjeldatakse stsenaariumeid, mida elektriautode mõju hindamisel vaadeldavas piirkonnas kasutatakse. Stsenaariumite loomisel on lähtunud riiklikest arengukavadest ja teadusartiklites leitud tulemustest.

Kuuendas osas kirjeldatakse vaatluse all olevat piirkonda, modelleeritakse saadud tarbimisandmeid kasutades eelmises peatükis välja toodud stsenaariumeid ja leitakse vastavad alajama ning fiidrite üheaegsustegurid.

Töö viimases seitsmendas osas analüüsitakse kuuendas peatükis saadud tulemusi. Tuuakse kokkuvõtvalt välja, kuidas erinev elektrisõidukite hulk mõjutab vaadeldava fiidri ja alajama üheaegsustegurit. Lisaks hinnatakse, kas ja kuidas tuleks elektrisõidukite erinevat laadimisvõimsust vaadeldava objekti üheaegsusteguri määramisel arvestada. Lõpetuseks antakse soovitused, kuidas elektrivõrgu planeerimisel tuleks elektrisõidukite lisandumisel vastavalt liitumispunktide arvule üheaegsustegur määrata.

2. ÜHEAEGSUSTEGURI OLEMUS

Üheaegsusteguri olemuse defineerimisel on oluline aru saada, mida üheaegsustegur endast kujutab, milliseid erinevaid lähenemisviise üheaegsusteguri leidmisel esineb ja kus seda kasutatakse. Antud töös on üheaegsusteguri mõiste defineerimine võtme tähtsusega, kuna ta on aluseks töös loetletud eesmärkide saavutamiseks.

2.1 Põhilised mõisted

Rahvusvahelises elektrotehnika sõnastikus ehk standardis IEC 60050 [1] defineeritakse rida mõisteid, mida antud töös kasutatakse. Oluline on sealjuures nendel mõistetel vahet teha, kuna neid võib omavahel lihtsasti segamini ajada. Enamiku neist on Kaija Viil oma magistritöös [2] eesti keelde tõlkinud.

Aasta (kvartali, kuu, nädala, päeva) maksimaalne nõudlus - annual (quaterly, monthly, weekly, daily) maximum demand

Kõrgeim väärtus tunni (pooltunni, veerandtunni, n – minutilise) nõudluse kohta, registreeritud aasta (kvartali, kuu, nädala, päeva) jooksul.

Koormustegur, koormusgraafiku täitetegur – load factor

Kindla ajavahemiku (aasta, kuu, päev jm) tarbimise suhe tarbimisse, mis tuleneb sama perioodi pidevast maksimaalsest või muust kindlaksmääratud nõudlusest. Koormustegurit väljendatakse numbriliselt või protsendiga. Alati tuleks täpsustav ajaperiood juurde lisada.

Üheaegsustegur ehk samaaegsustegur – coincidence factor

Elektriseadmete või tarbijate grupi kindla ajavahemiku jooksul esinenud üheaegse maksimaalse tarbimise suhe samal ajaperioodil esinenud individuaalsete maksimaalsete tarbimiste summasse. Üheaegsustegurit väljendatakse numbriliselt või protsendiga ning tema väärtus on $\leq 1,0$. Selle mõiste puhul tuleb täpsustada, millisele süsteemi tasandile see viitab.

Eriaegsustegur – diversity factor

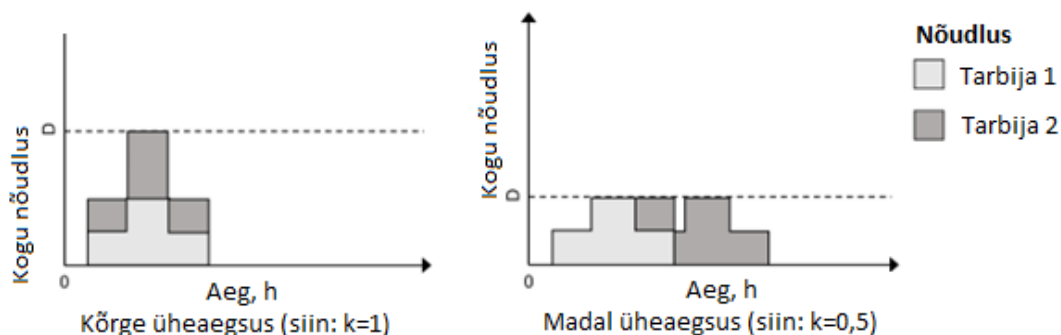
Üheaegsusteguri (*coincidence factor*) pöördväärtus, suuruselt $\geq 1,0$. Eriaegsustegur on omakorda suhe süsteemi erinevate osade individuaalsete maksimaalsete nõudmiste summa ja tervikliku süsteemi maksimaalse nõudmise vahel [3].

Koormatustegur – demand factor

Paigaldise või paigaldiste grupi kindla ajavahemiku jooksul esinenud maksimaalse nõudluse suhe vastava paigaldise või paigaldiste grupi summaarsesse installeeritud võimsusesse. Koormatustegurit väljendatakse numbriliselt või protsendiga. Selle mõiste puhul tuleb täpsustada, millisele süsteemi tasandile see viitab.

2.2 Üheaegsusteguri erinevad lähenemisviisid

Üheaegsustegur elektrisüsteemides sõltub mitmest erinevast tegurist. Olulisemad neist on inimeste käitumuslikud harjumused, kogukonna ja ettevõtete tavapärased tegevused, ilmastiku- ja muud kliimatingimused ja kasutusele võetavate seadmete disain [4]. Üheaegsustegur näitab tarbijate nõudluse kokkulangevust (**Error! Reference source not found.**). Seega tuleb üheaegsusteguri leidmisel tähele panna, mis seda eelkõige mõjutavad ja hinnata kui suurt mõju need tegurid üheaegsusteguri määramisel omavad. Samuti on oluline, millises (elektri)süsteemi punktis üheaegsustegurit arvestatakse.



Joonis 2.1 Kahe tarbija üheaegsus erineva nõudluse kokkulangevuse korral [5]

2.2.1 Herman-Beta jaotus

1991. aastal alustati Lõuna-Aafrika vabariigis koormuste uurimise programmiga. See oli vajalik elektrifitseerimise programmi tõttu, mille eesmärgiks oli elektri pakkumine suurele osale elanikkonnast. Selle asemel, et arvestada võimsusega, mõõdeti ja analüüsiti koormusvoolu, mis sai tuntuks kui Herman-Beta meetod [6].

Leiti, et voolud tarbijate maksimaalse nõudluse ajal on kõige parem kirjeldada beeta tõenäosusfunktsioonina. Selline jaotus võib olla piiratud minimaalse väärtuse, milleks on null ja kindla maksimaalse väärtuse vahel, näiteks kaitselüliti nominaalväärtus. Beeta jaotusfunktsioon on kirjeldatud tavaliselt kahe positiivse parameetriga α ja β [6].

2.2.2 Velanderi valem või Strand-Axelssoni valem

Velanderi valem on laialdaselt kasutusel Skandinaavias ja seda kirjeldas Velander umbes aastal 1950. Axelsson ja Strand kasutasid valemit CIREDi väljaandes ja seda hakati tundma ka kui Strand-Axelssoni valemit [6]. Meetodit kasutatakse aastaste energiakoguste teisendamiseks maksimaalseks nõudluseks kliendi kohta P_{max} .

N tarbija üheaegsuse võib lisada Velanderi valemisse ja nii saab üheaegse tippnõudluse arvutada valemiga (2.1):

$$P_{max}(n) = n \cdot k_1 \cdot E + k_2 \cdot \sqrt{n \cdot E} \quad (2.1)$$

kus $P_{max}(n)$ – maksimaalne nõudlus kohal n ;

n – tarbijate arv;

k_1, k_2 – empiirilised väärtused;

E – aastane energiakogus.

2.2.3 Normaaljaotus

Üks võimalus on kasutada üheaegsuse uurimisel normaaljaotust. Vastavalt S.Rusckile, kui uuritakse sarnaseid tarbijaid või koormuseid, siis nende nõudlus ei ole normaalselt jaotatud, kuid üksikute koormuste tiputundidel on nõudlus normaalselt jaotatud. Rusck tuletab üheaegsusteguri sejärel välja standardhälbest. Standardhälve on määratletud võrrandis 2.2 ja see on võrdeline koormuse i maksimaalse võimsuse ja keskmise võimsuse erinevuse vahel [7].

$$\sigma_i = \sqrt{\int (P_{max}(t) - P_0)^2 dt} \quad (2.2)$$

Kogu standardhälve leitakse järgmiselt:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2} \quad (2.3)$$

$$P_{max}(n) - \sum_{i=1}^n P_{0,i} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{max,i} - P_{0,i})^2} \quad (2.4)$$

$P_{max}(n)$ on maksimaalne üheaegne koormus ja avaldub valemis 2.5.

$$P_{max}(n) = n \cdot P_0 + (P_{max,i} - P_0) \cdot \sqrt{n} \quad (2.5)$$

Üheaegsustegur c avaldub vastavalt võrrandile 2.5 järgmiselt:

$$c = \frac{P_{max}(n)}{n \cdot P_{max,i}} = \frac{P_0}{P_{max,i}} + \left(1 - \frac{P_0}{P_{max,i}}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} = c_\infty + (1 - c_\infty) \cdot n^{-\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

kus σ – standardhälve;

$P_{max}(n)$ – maksimaalne üheaegne võimsus n koormuse korral;

$P_{0,i}$ – koormuse i keskmine võimsus;

$P_{max,i}$ – koormuse i maksimaalne võimsus;

n – koormuste arv;

c_∞ – P_0 ja $P_{max,i}$ vaheline suhe.

2.3 Üheaegsustegur elektrivõrgu planeerimisel

Üheaegsustegur on elektrivõrgu planeerijate jaoks üheks olulisemaks parameetriks võrgu hindamisel mõjutades otseselt elektrivõrgu elementide – trafode, liinide, kaitseadmete jne valikut. Sellega seoses aitab see neil hinnata olemasoleva võrgu investeringute vajalikkust või planeeritava võrgu täpsemat hinnangulist maksumust.

Elektrivõrgu planeerimise peamisteks sammudeks on [8]:

1. Elektrienergia koormuse prognoosimine.
2. Võrgu adekvaatsuse analüüs tulevase koormuse jaoks.
3. Tulevase võrgu modelleerimine uute koormuste jaotamiseks.
4. Võrgu tugevdamine.

Jaotusvõrgud on kriitilised süsteemid, mis on loodud tarbijate elektrinõudluse rahuldamiseks igal hetkel. Elektrivõrgud on tavaliselt radiaalsed süsteemid ja ehitatud tavaliselt nii, et energia liiguks allikast tarbijateni. Seetõttu on võrgu iga element dimensioneeritud vastavalt maksimaalsele koormusele, mida ta korraga toidab, mida nimetatakse üheaegseks nõudluseks. Üldiselt on üheaegne nõudlus väiksem, kui iga individuaalse tippnõudluse summa. Seega, mis tahes koormuse korral, üheaegsustegur on suhe üheaegse tippkoormuse ja individuaalsete tippkoormuste summa vahel [5].

Viimastel aastatel on nutikate elektriarvestite levik ühises elektrivõrgus võimaldanud reaajas andmeid koguda tuhandetelt majapidamistelt, mis loob võimaluse üheaegsusteguri veelgi täpsemaks hindamiseks [5].

Üheaegsustegur võtab arvesse ajalisi seoseid elektrivõrgu klientide koormuste vahel. Seega näitab see ka samaaegselt esinevate võrguklientide elektrikoormuste tõenäosust: mida suurem on üheaegsustegur, seda suurem on võrgus olevate klientide koormuste üheaegne kasutamise tõenäosus. Järelikult, mida rohkem kliente võetakse arvesse, seda madalam on ka üheaegsustegur [9].

2.3.1 Üheaegsusteguri arvutamine madalpingevõrgus

Üheaegsustegur sõltub tarbijate arvust ning ta peab olema analüüsimiseks kohandatud vastavalt elektrivõrgu struktuurile. Elektrivõrgu punkti, kus toidetakse paljusid tarbijaid (nt KP/MP alajaamad) iseloomustab madal üheaegsustegur. Seevastu kohta, kust toidetakse väheseid tarbijaid (nt fiidrite lõpud) iseloomustab kõrge üheaegsustegur [9].

Kuna individuaalsete kasutajate (tarbijate koormus) profiil ei ole ühtlane ja on tavaliselt iseloomustatud rohkem kui ühe äärmusega, ei pruugi fiidri koormusprofiili tipp (maksimum) esineda üksikute kasutajate tippkoormuste ajal. Esineb mitte lineaarne või isegi põimunud üksikute tippude ülekate [10].

Üheaegsustegurit võrgu vaates võib defineerida kui fiidri tippvõimsuse ja summeritud koormuste tippvõimsuste suhet [10]:

$$k_j = \frac{P_j}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (2.7)$$

kus P_j – fiidri tippvõimsus n koormuste korral;

P_i – koormuse i tippvõimsus.

Hästi tuntud üheaegsuse funktsioon, mida kasutatakse näiteks madalpingevõrkude planeerimiseks Saksamaal, on väljendatud järgmise funktsioonina[11]:

$$S_{hh}(n) = c + \frac{1-c}{n} \quad (2.8)$$

kus $S_{hh}(n)$ – üheaegsusfunktsioon kohal n ;

c – üheaegsusfunktsiooni piirväärtus;

n – vaadeldavate tarbijate arv.

Näiteks tüüpiliste majapidamiste (nt $c = 0,07$) puhul, ühe majapidamise toiteliini planeerimisel tuleb arvestada 100%-se koormusega, samas kui 10 majapidamise puhul tuleb arvestada 16%-se kogu koormusega. [11] Sellest järeldub, kuidas suurema

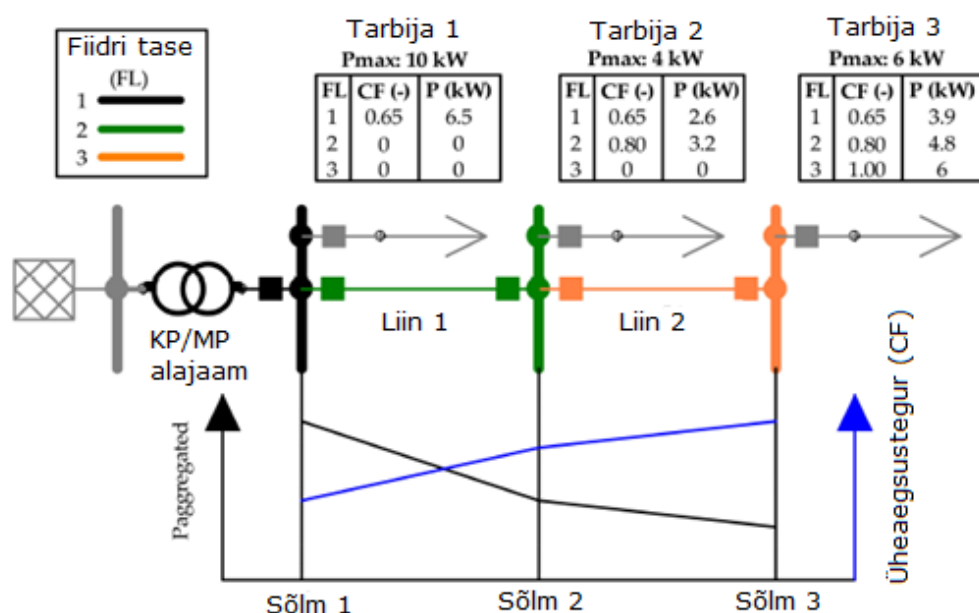
majapidamiste arvu korral väheneb üheaegsuse mõju ja võrgu planeerimine muutub tõhusamaks ja võrku vähem koormavaks.

2.3.2 Üheaegsusteguri määramise erinevad lähenemisviisid madalpingevõrgus

Üheaegsusteguri määramisel madalpingevõrkudes on võimalik kasutada erinevaid lähenemisviise. Deterministlike võrgusimulatsioonide tegemisel on võimalik üheaegsustegurit kirjeldada järgmiselt:

- Üksik, muutumatu üheaegsustegur (Single, Consistent Coincidence Factor);
- Üksik, võrguspetsiifiline üheaegsustegur (Single, Grid-Specific Coincidence Factor);
- Topelt, võrguspetsiifilised üheaegsustegurid (Double, Grid-Specific Coincidence Factors).

Hartvigsson ja Gupta [9] määrasid iga võrgu jaoks ühe konkreetse üheaegsusteguri, mis põhineb KP/MP alajaama poolt varustatavate võrgu klientide arvu. See üksik väärtus rakendatakse igale võrgu kliendile koormuse voo simulatsioonide tegemiseks. See tähendab, et iga võrgu jaoks määratakse üks üheaegsustegur, mis arvestab selle võrgu struktuuri ja klientide arvu ning seejärel kasutatakse seda tegurit koormuse voo simulatsioonide läbiviimiseks igale võrgu kliendile (Joonis 2.2).



Joonis 2.2. Üheaegsusteguri määramine ja sellest tulenev määratud võrgu klientide koormus sõltuvalt analüüsitud toitefiidrist [9]

Lemmens jt rakendasid [9] igale võrgu kliendile üheaegsusteguri ehk kasutasid üksikut võrguspetsiifilist üheaegsustegurit. Seetõttu arvestatakse igale alajaama fiidriale vastav üheaegsustegur tulenevalt tarbijate arvust.

Erinevalt varasematest töödest kasutavad Oesterreichs Energie ja Agora poolt tehtud uuringud iga võrgu kliendi puhul kahte erinevat üheaegsustegurit, sõltuvalt analüüsitavast võrgu elemendist. Üheaegsustegur, mida rakendatakse KP/MP alajaama analüüsimiseks, määratakse alajaama varustatavate klientide koguarvu põhjal. Teise koormusvoo simulatsiooni jaoks kasutatakse iga toiteliini poolt varustatavate klientide arvu, et määratleda üheaegsustegur kõikidele vastava toiteliini elementidele. Mõlemat üheaegsustegurit varieeritakse iga MP võrgu jaoks spetsiifiliselt [9].

Üksik muutumatu üheaegsustegur, mis põhineb mingisugusele keskmisele tarbijate arvule alajaama kohta ei anna vastust tegelikule tarbijate arvule ja tõlgendab vääralt võrgu parameetreid mitmetes analüüsitavates võrkudes. Seega ülehinnatakse selle meetodi kohaselt KP/MP alajaama üheaegsustegurit võrkudes, kus on oluliselt rohkem majapidamisi kui keskmises võrgus, mille jaoks seda üheaegsustegurit arvutatakse. Vastupidiselt sellele alahinnatakse KP/MP alajaama üheaegsustegurit võrkudes, kus on märkimisväärselt vähem majapidamisi [9].

Need tulemused näitavad, kui oluline on võrguklientide üheaegsustegurite õige kasutamine. Üksiku üheaegsusteguri kasutamine esimese lähenemisviisi korral alahindab võrgukoormusi, kuna tegelikkuses üheaegsustegurid suurenevad väiksemate klientide arvu korral. Seevastu hinnatakse oluliselt adekvaatsemalt võrgukoormusi, kui kasutatakse mitmeid erinevaid üheaegsustegureid vastavalt tarbijate arvule.

3. SISERIIKLIKE JA RAHVUSVAHELISTE ARENGUKAVADE JA REGULATSIOONIDE ANALÜÜS

Elektrisõidukite mõju uurimiseks madalpingevõrgu üheaegsusteguri määramisele tuleb mõista, millises suunas antud vallas ühiskond liigub. Selleks on riikides ja riiklikes ühendustes vastu võetud mitmeid dokumente, mis esitavad nõudeid ja annavad suuna, millest juhinduda kliimaeesmärkide saavutamisel.

3.1 Euroopa Liidu energiasektori eesmärgid aastani 2050

Euroopa Liit (EL) on vastavalt Pariisi kliimakokkuleppele vastu võtnud rida eesmärgi, et jõuda kliimanetraalsuseni aastaks 2050. Üks mahukamaid neist on pakett „Fit for 55“ („Eesmärk 55“), mille vahe eesmärgiks on vähendada 2030 aastaks kasvuhoonegaaside netoheidet vähemalt 55% [12] enne kliimanetraalsuseni jõudmist aastaks 2050. Antud dokument käsitleb paljusid erinevaid valdkondi, kus tuleb teha mitmeid erinevaid muudatusi püstitatud eesmärkide saavutamiseks, kuid antud lõputöö raames on neist huvipakkuvamad järgmised kaks:

1. **Euroopa parlamendi ja nõukogu määrus (EL) 2019/631** [13], millega kehtestatakse uute sõiduautode ja uute väikeste tarbesõidukite CO₂-heite normid
2. **Euroopa parlamendi ja nõukogu määrus (EL) 2023/...** [14], milles käsitletakse alternatiivkütuste taristu kasutuselevõttu

3.1.1 Uute sõiduautode ja uute väikeste tarbesõidukite CO₂- heite normid

Neist esimese määrusega [13] kehtestatakse alates 1. jaanuarist 2020 Euroopa Liidus (EL) registreeritud uute sõiduautode ELi sõidukipargi keskmise CO₂-heite sihttase 95 g/km ja liidus registreeritud uute väikeste tarbesõidukite ELi sõidukipargi keskmise CO₂-heite sihttase 147 g/km. Alates aastast 2025 vähendatakse neid tasemeid 15% võrra, alates aastast 2030 55% võrra ning aastast 2035 100% võrra. Antud määruse vastu võtmisega suunatakse ühiskonda üha enam ning kiiremini looma ja kasutama alternatiivkütustel sõitvaid sõidukeid.

3.1.2 Alternatiivkütuste taristu kasutuselevõtt

Alternatiivkütuste taristu kasutuselevõttu käsitlevas määruses [14] tagavad liikmesriigid, et nende territooriumil võetakse kasutusele elektriliste kergsõidukite üldsusele juurdepääsetavad laadimisjaamad ulatuses, mis vastab elektriliste kergsõidukite kasutuselevõtule, ja et niisugused laadimisjaamad tagavad kõnealustele sõidukitele piisava väljundvõimsuse. Selleks tagavad liikmesriigid, et alates 2023. aastast saavutatakse iga aasta lõpus kumulatiivselt järgmised väljundvõimsuse sihid:

- a) iga nende territooriumil registreeritud akutoitega elektrilise kergsõiduki kohta on üldsusele juurdepääsetavate laadimisjaamade kaudu pakutav kogu väljundvõimsus vähemalt 1,3 kW ning
- b) iga nende territooriumil registreeritud pistikühendusega kerghübriidsõiduki kohta on üldsusele juurdepääsetavate laadimisjaamade kaudu pakutav kogu väljundvõimsus vähemalt 0,80 kW.

Samuti tagavad liikmesriigid, et

- a) TEN-T (üleeuroopaline transpordivõrk) põhiteedevõrgus võetakse igas sõidusuunas kasutusele elektriliste kergsõidukite üldsusele juurdepääsetavad laadimisjaamad, mille maksimaalne vahekaugus on 60 km ja mis vastavad järgmistele nõuetele:
 - i) 31. detsembriks 2025 pakub iga laadimisjaama väljundvõimsust vähemalt 400 kW ja koosneb vähemalt ühest laadimispunktist, mille individuaalne väljundvõimsus on vähemalt 150 kW;
 - ii) 31. detsembriks 2027 pakub iga laadimisjaama väljundvõimsust vähemalt 600 kW ja koosneb vähemalt kahest laadimispunktist, mille individuaalsed väljundvõimsused on vähemalt 150 kW;
- b) TEN-T üldteedevõrgus võetakse igas sõidusuunas kasutusele elektriliste kergsõidukite üldsusele juurdepääsetavad laadimisjaamad, mille maksimaalne vahekaugus on 60 km ja mis vastavad järgmistele nõuetele:
 - i) 31. detsembriks 2027 pakub TEN-T üldteedevõrgu pikkusest vähemalt 50 % ulatuses iga laadimisjaama väljundvõimsust vähemalt 300 kW ja koosneb vähemalt ühest laadimispunktist, mille individuaalne väljundvõimsus on vähemalt 150 kW;
 - ii) 31. detsembriks 2030 pakub iga laadimisjaama väljundvõimsust vähemalt 300 kW ja koosneb vähemalt ühest laadimispunktist, mille individuaalne väljundvõimsus on vähemalt 150 kW;
 - iii) 31. detsembriks 2035 pakub iga laadimisjaama väljundvõimsust vähemalt 600 kW ja koosneb vähemalt kahest laadimispunktist, mille individuaalsed väljundvõimsused on vähemalt 150 kW.

Erandina ülaltoodud nõudest, mille kohaselt on kergsõidukite üldsusele juurdepääsetavate laadimisparkide maksimaalne vahekaugus 60 km, võivad liikmesriigid TEN-T võrgu maanteedel, kus kogu keskmine aastane liiklustihedus on väiksem kui 3000 kergsõidukit päevas, lubada selliste laadimisparkide puhul pikemat, kuni 100 km pikkust vahekaugust, tingimusel et laadimisparkide vahekaugusele osutavad asjakohased viidad.

Lisaks käsitleb antud määruse artikkel 4 elektriliste raskeveokitega seotud sihid liikmesriikidele.

3.2 Eesti energiasüsteemi eesmärgid ja prognoos aastani 2050

Eesti Vabariik lähtub riigi energia- ja kliima eesmärkide kirjeldamisel eelkõige Euroopa Liidu poolt kõigile liikmesriikidele koostatud määruste pakettist „Fit for 55“.

3.2.1 Eesti elektritarbimise prognoos

Eesti põhivõrgu ettevõtte Elering koostab igal aastal Eesti elektrivarustuskindluse aruannet. Neist viimatises, 2022. aasta aruandes, on välja toodud, et on kolm peamist tegurit, mis mõjutavad elektritarbimist [15]:

1. Hoonete rekonstrueerimine ja hajatootmise kasv – Uute hoonete energiatõhususe miinimumnõudeks on A-klass ehk liginullenergia hoone, mille täitmise üheks võimaluseks on lokaalse taastuvelektri tootmise (päikesepaneelide) paigaldamine. Hoonete juurde päikesepaneelide paigaldamine vähendab aastast energiatarbimise kasvu kiirust, kuid toob kaasa suurema volatiilsuse võrguelektri tarbimises, juhul kui ei hakata paigaldama lokaalset energia salvestust (akusid või küttesüsteemi akumulatsioonipaake) või kasutama tarbimise juhtimist.
2. Maagaasi tarbimise osaline asendumine elektritarbimisega - Hoonete energiatõhususe nõuete tõttu väheneb tõenäoliselt väikeste ja vähemefektiivsete kaugküttevõrkude arv, mis seni kasutasid maagaasi ning toimub üleminek lokaalsetele elektrilistele soojuspumpadele. Suuremates kaugküttevõrkudes nagu Tallinn, Tartu ja Pärnu võetakse tulevikus lisaks koostootmisjaamadele kasutusele suured elektrilised soojuspumbad, mis suudavad kasutada kohaliku veekogu või linna reovee soojust.
3. Transpordisektori elektrifitseerimine – 2022. aasta esimesel poolaastal on rohkem kui kümnes Euroopa riigis üle 10% müüdnud sõidukitest täiselektrilised ja 2021. aastal oli 19% Euroopas müüdnud sõidukitest kas täiselektrilised või

plug-in hübriidid. Eestis on vastavad osakaalud ~3% ja 5%, kuid ka Eestis on oodata elektrisõidukite osakaalu suurenemist sõidukipargis.

Selleks, et hinnata antud tegurite mõju ja selgitada välja elektritarbimise tulevik lasi Elering koostada Eesti elektritarbimise stsenaariumite uuringu. Uuringuga leiti elektri nõudluse stsenaariumid kodumajapidamiste, teenindus-, tööstus- ja transpordisektori jaoks kuni aastani 2050, võttes arvesse energiaefektiivsuse kasvu, majanduse orgaanilist kasvu, fossiilse energiatarbimise elektrifitseerimist transpordi- ja tööstussektoris. Kuigi tulenevalt kiirenevast elektrifitseerimisest leiab aset elektritarbimise kasv kõikides uuringus vaadeldud sektorites, siis transpordisektori elektritarbimise kasv moodustab orienteeruvalt poole kogu elektritarbimise kasvust 2050. aasta perspektiivis [16].

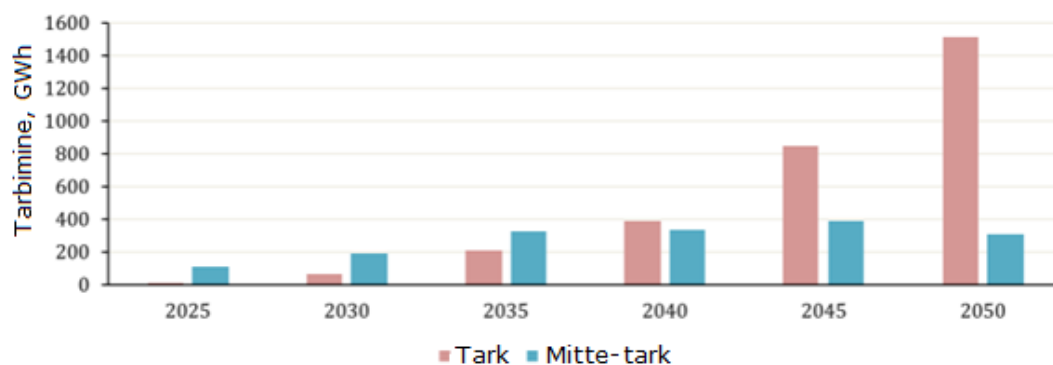
Koostatud analüüsis on autorid kõikide elektri tarbimise sektorite jaoks loonud kolm erinevat stsenaariumit: madal (low), baas (base) ja kõrge (high). Baasstsenaariumis järgitakse eeldustena Eestis ja Euroopas varasemalt koostatud uuringuid, strateegiaid ning teekaarte. Madalas ja kõrges stsenaariumis on eeldusi muudetud vastavalt madalama ja kõrgema elektrinõudluse suunas. [16].

Prognoos näeb ette elektrisõidukite arvu olulist kasvu (Tabel 3.1). Sellest tulenevalt on oodata ka elektrisõidukite poolt tarbitava elektrienergia kasvu. Tarbijate koduse laadimise kasv on toodud Joonis 3.1. 2050. aastaks prognoositakse baas stsenaariumi korral nii targa kui mitte targa laadimise puhul tarbitavaks elektrienergiaks kokku ligemale 1800 GWh, mis võrreldes 2030. aasta tulemusega - 250 GWh, on üle 7 korra suurem.

Kuna autode keskmine päevas läbitud distants on 42 km, siis on ühe elektriauto laadimisvajadus päevas ainult orienteeruvalt 10 kWh elektrit. Seega, 11 kW võimsusega laadijaga (tüüpiline kodulaadija võimsus), kulub tavapärasel päeval ühel autol keskmiselt laadimiseks ainult üks tund. Kokkuvõtteks, kuna uuringute põhjal laevad inimesed oma elektrisõidukeid ainult 3-4 korda nädalas ja päevane elektrivajadus ei ole väga suur, siis on ebatõenäoline, et kõik või enamik elektrisõidukite omanikke ühendaks oma autod võrguga täpselt samal ajal ja laeks neid samaaegselt, mis kõik vähendab ühel ajahetkel võrgust tarbitava elektri kogust. Täiendavalt, mida laiemalt levivad targa laadimise tehnoloogiad, seda rohkem jaotub elektri tarbimine nädalapäevade ja päeva tundide vahel ühtlasemalt [16].

Tabel 3.1. Elektrisõidukite arvu prognoos [16]

tk/aastas	2030	2040	2050
Elektrilised autod ja kaubikud	82 273	253 048	666 898
Elektrilised bussid	262	1 208	2 231
Elektrilised veokid	1 282	5 495	11 256
Elektrilised mootorrattad	8 184	25 172	66 339



Joonis 3.1. Elektriauto kodulaadimise tarbimine [16]

3.2.2 Eesti elektrivõrgu areng ja eesmärgid

Eesti on oma energiapoliitilised eesmärgid kirjeldanud 2017. aastal koostatud arengukavas „Energiamajanduse arengukava aastani 2030“ (ENMAK 2030) [17]. Sealses Eesti soojusmajanduse visioonis aastani 2050 on öeldud, et soojust toodetakse valdavalt kohalikest ja taastuvatest kütustest ning kütusevabadest energiaallikatest. Taastuenergia osakaaluks kaugküttesoojuse tootmises peab olema 2030. aastaks saavutatud üle 80%. Tulenevalt hoonete energiatõhususe investeeringutest ja soojuse tootmise efektiivsemaks muutumisest väheneb kütuste kasutamine soojuse tootmiseks aastaks 2050 rohkem kui 40 % võrreldes 2012. aasta tasemega. Samuti on välja toodud, et lokaal- ja kohtküte omab tulevikus soojuse lõpptarbimises järjest suuremat rolli, sundides ebaefektiivseid kaugküttepiirkondi enda tegevust tõhustama. Seeläbi on võetud eesmärgiks, et aastaks 2050 vastab Eesti elamufondist kolmandik liginullenergiahoone energiatõhususarvu väärtusele ja hoonete sisekliima kehtivatele standarditele. Tagatud on meeldiv, kvaliteetne ja energiasäästlikult ning terviklikult lahendatud elukeskkond [17].

Transpordisektoris tuleb EL kliima- ja energiapoliitika eesmärkide täitmiseks liikuda järk-järgult efektiivsema kütusetarbimisega sõidukipargi suunas, mis koos teiste rakendatavate meetmetega aitab vähendada transpordisektoris tekkivat kasvuhoonegaaside heidet [17]. Üheks alternatiiviks sealjuures ongi sise põlemismootoriga sõidukite asendamine elektrimootoriga sõidukitega.

ENMAK 2030 arengukavas on eesmärgiks võetud kütusevabade energiaallikate (päike, tuul, hüdroenergia) osakaaluks saada 2030. aastaks 10% elektri lõpptarbimises. Hüdroenergia võimsuste kasvu Eestis ei nähta, seega on eesmärgi saavutamisel oluline just tuule- ja päikeseenergia tootmise kasv.

Eesti on oma riiklikus energia- ja kliimakavas aastani 2030 (REKK 2030) [18] välja toonud, et nende eesmärgiks on 2030. aastaks päikeseenergiast toodetava energia osakaaluks kogu taastuvenergia toodangust saavutada 41 GWh. Võrreldes Eesti elektritarbimise stsenaariumite uuringuga [16], kus 2030. aastaks prognoositakse päikeseelektri toodanguks ligemale 1000 GWh, on see eesmärk suuresti alahinnatud. Lisaks on võetud eesmärgiks kasvatada elektritranspordi tarbimist 729 GWh- ni ja soojuspumpade tarbimist soojusmajanduses 1400 GWh-ni [18].

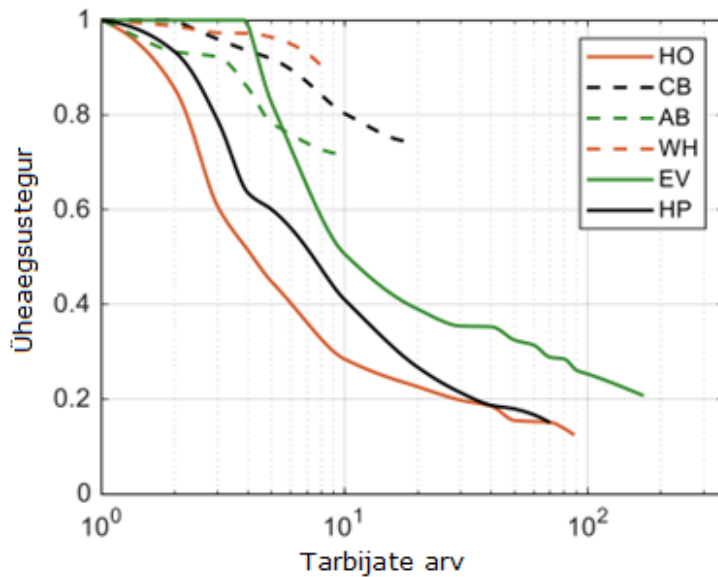
Hetkel käib aga uue arengukava – ENMAK 2035 koostamine, seega kaasajastatakse olemasolevad eesmärgid võttes aluseks Euroopa kliimaeesmärkide paketti „Fit for 55“.

4. ELEKTRITARBIMISE JA -TOOTMISE MUUTUSTE MÕJU ÜHEAEGSUSTEGURILE VÕRGUS

Üheaegusteguri planeerimisel madalapingevõrgus on lisaks tarbijate arvule oluline teada, millised elektrienergia tarbijad ja tootjad võrku kuuluvad nii planeerimise hetkel kui tulevikus. Erinevad suuremad elektrienergia tarbijad ja tootjad, mis elektrivõrgu klientide koormusgraafikuid muutma hakkavad on elektrilised soojuspumbad, elektriautod, päikesepargid ja erinevad salvestussüsteemid.

Päiksepaneelide (PV), soojuspumpade (HP) ja elektriautode (EV) kasutamine muudab oluliselt hoonete koormusprofiili, nii energia kui ka võimsuse osas. PV võib tekitada jaotusvõrgus tagasipöörduvat elektrivoogu, mis võib potentsiaalselt põhjustada pinget rikkumisi ja jaotusliinide ülekoormust. HP ja EV kasutamine suurendab omakorda tipptarbimist. Senini on need kolm tehnoloogiat jaotusvõrkudesse integreeritud võrgu vastuvõtmise limiite ületamata. Kuid pärast seda, kui vastuvõtmisvõime on pideva tehnoloogia lisamisega täis saavutatud, on vaja uuendada või isegi täielikult ümber ehitada olemasolevaid alajaamu ja tugevdada liine. Seega võivad PV, HP ja EV lisamine kaasa tuua suured investeeringud jaotussüsteemi operaatoritele ning lõppkokkuvõttes mõjutada tarbijate elektriarvet. Seetõttu peavad operaatorid hoolikalt planeerima PV, HP ja EV paigaldamist, et tagada sujuv ja kulutõhus energiamuutus [8].

Kõigil eelpool mainitud tarbijatel ja tootjatel on tarbijate hulgast sõltuv üheaegsus. Joonis 4.1 on võrreldud erinevate tarbijate üheaegsustegureid sõltuvalt tarbijate arvust. Nagu näha, siis elektriautode laadimise puhul on üheaegsus suurem võrreldes kodude ja soojuspumpadega. Kontrollimatu laadimise puhul, peamiselt öhtutundidel, määratakse isegi lausa nelja sõiduki laadimise üheaegsuseks peaaegu üks, arvestades elektriautode laadimisvõimsuseks 3,7–11 kW [19].



Joonis 4.1 Üheaegsusteguri muutus erinevate tarbijaklasside korral (HO (household) – kodumajapidamine, CB (commercial businesses)- äriettevõtted, AB agricultural businesses) – põllumajandusettevõtted, WH (electrical water heaters) – elektrilised veesoojendid, EV (electrical vehicles) – elektriautod, HP (heat pumps) – soojuspumbad [19]

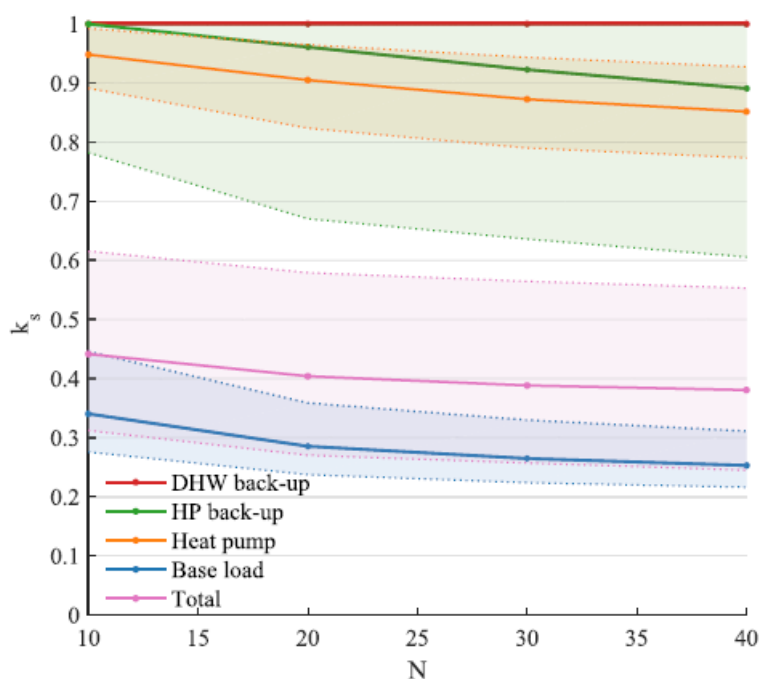
4.1 Soojuspumpade mõju

Soojuspumbad on kujunenud atraktiivseks alternatiiviks fossiilkütustel baseeruvate küttesüsteemide asendamiseks elamutes. Ruumide kütmisel kaalutakse just soojuspumpade kasutamist, kuna nad suudavad vähendada majapidamiste lõplikku energiatarbimist kuni 70% [20][21].

Õhksoojuspumbad omavad uuritavatele toiteliinidele suuremal määral mõju kui näiteks päikeseenergia süsteemid, kui rääkida liini koormusest ja pingetaseme suuruselt. Lisaks on maapiirkondade toitejuhtmed ülekoormamise ja alapinge probleemide suhtes tundlikumad kui linnapiirkondade omad. Suurte maapiirkonna toiteliinide puhul võib näha kaabli ülekoormamist sõltuvalt kaablist juba 30% soojuspumba kasutuselevõtu korral, samas kui pingeprobleemid algavad tavaliselt veidi kõrgematel protsentidel. Tulemused näitavad, et omades 30%-st soojuspumpade osakaalu linna- ja maa madalpingevõrkudes, suurenevad tipukoormused vastavalt 30% ja 50%, tekitades tõsisid ülekoormuse probleeme [22][23].

Seega on väga oluline määrata edasiste probleemide ära hoidmiseks võrgu planeerimisel korrektsed üheaegsustegurid. Nagu valemis 2.7 on kirjeldatud, siis

üheaegsustegur on määratletud kui süsteemi üheaegse maksimaalse nõudluse ja individuaalsete maksimaalsete nõudluste summa suhe antud tüüpi koormuse jaoks määratletud perioodil. Siin arvestatakse seda toiteliini tippkoormuse ja üksikelaemute tarbimistippude summa suhtena aastase perioodi ja erinevate koormuste korral. Joonis 4.2 näitab, kuidas üheaegsustegur k_s sõltub tarbijate arvust erinevate koormustüüpide korral. Baaskoormuse korral, kus ei ole arvestatud soojuspumpadega täheldatakse madalaid tegureid väikese varieeruvusega vahemikus 0,2 kuni 0,4. Vastupidiselt sellele on soojuspumpade arvestamisel palju kõrgem üheaegsus - umbes 0,9, tingituna sarnastest küttegaafikutest kõikidele majadele.



Joonis 4.2. Üheaegsustegur k_s erinevate koormustüüpide puhul [22]

Veelgi kõrgemad üheaegsustegurid kohanduvad soojuspumpade lisakütteseadmetele, mis pannakse tööle väga külmades oludes. Kui vaadata aga üldist elektrinõudlust, siis on üheaegsustegur madalam, varieerudes vahemikus 0,25 kuni 0,6 toiteliinides, kus on kuni 40 tarbijat. On leitud, et kui üheaegsustegur olemasolevas võrgus on 0,7, siis võrk suudab kõige halvemal juhul veel mahutada täiendavat koormust, mis vastab soojuspumpade 20% osakaalu tõusule. Lisaks tasub märkida, et madalpinge alajaama transformatorid on ainsad elemendid, mis on üle koormatud, kui soojuspumba koormus ületab selle taseme [22][21].

On näha, et üleminek elektrifitseeritud kütmisele vähendab oluliselt elektrikoormuse mitmekesisust elamupiirkondades, mida tuleks arvesse võtta elektrivõrgu kujundamisel ja haldamisel. Eriti vastutavad tagavara kütteseadmed suure osa tipukoormuse ja sellest tulenevate probleemide eest. Nende probleemide lahendamiseks on vajalik

rakendada meetmeid nii individuaalsete tarbijate tasandil, näiteks tagavara-kütteseadmete kasutamise ja suuruse vähendamine või termilise salvesti lisamine, kui ka toiteliini tasandil. Digitaliseeritud elektrivõrkude (smart grid) tehnoloogiad, sealhulgas nutiarvestid ja iga toiteliini vajadustele kohandatud arvutipõhine kaugjuhtimine võiksid aidata võrgu stabiilsust parandada. Nõudluse haldamine hinna järgi võib aga võrguprobleeme hoopis süvendada, nõudes toiteliinide tugevdamist [22].

4.2 Päikesepaneelide ja akusalvestuse mõju

Selleks, et aru saada, kuidas päikesepaneelidest energia tootmine ja energia salvestamine avaldab mõju üheaegsustegurile elektrivõrgus, tuleb kõigepealt mõista, millist mõju need tehnoloogiad elektrivõrgule avaldavad.

Üha suurenev päikeseenergia elektritootmise osakaal võib põhjustada võrgupingete rikkumisi madalpingevõrkudes ja viia koormusprofiilide muutuseni, mis omakorda võivad põhjustada vastupidiseid energiavoogusid. Taastuvenergia tootmisega seotud võrguprobleemide leevendamiseks madalpingevõrkudes saab kasutada (aku)salvesteid. Salvestustehnoloogiaid kasutades on võimalik päikeseenergia tootmise ja elektritarbimise kokkulangevust suurendada koormuse ajalise nihutamise kaudu. Siinkohal viitab koormuse nihutamine elektrienergia kasutamise ajalisele nihutamisele, mis ei mõjuta tarbimist [24][25]. See ajaline elektrienergia tarbimise ja tootmise nihutamine võib avaldada olulist mõju tarbimistippude vähendamisel.

Energiasalvestus suurendab päikeseenergia kasutegurit kahel viisil. Esiteks ta salvestab üleliigse päikeseenergia ja võimaldab seda kasutada siis, kui energiat ei toodeta. Teiseks suurendab suuremahuline energiasalvestuse rakendamine oluliselt süsteemioperaatorite/võrguettevõtete paindlikkust [25]. Sellest tulenevalt on võimalik vähendada nii üheaegset elektrienergia tarbimist kui tootmist võrgus.

Enamjaolt toodavad päikesepaneelid maksimaalset võimsust suve keskel aset leidva puhkuseperioodi ajal, mil tarbimine on minimaalne. Lisaks toodetakse päikeseenergiat madalpingesüsteemides, mis on kavandatud ainult koormuse jaotamiseks. Need asjaolud on tekitanud suuri ülekoormuse probleeme näiteks Saksamaa lõuna osa kõrgepinge jaotussüsteemides [26]. Seega ei tule päikeseparkide mõju puhul madalpingevõrgu üheaegsustegurile niivõrd vaadata tarbimise üheaegsust, vaid rohkem maksimaalset tootmisvõimsust ja seeläbi tootmise üheaegsust.

Päikesepaneelide mõju uurimisel elektrivõrgu üheaegsustegurile tuleb arvestada, et põhiline tegur, mis nende tootlikkust mõjutab on ilm. Päikeseparkide endi üheaegsustegur ei ole suuresti mõjutatud teistest teguritest, seega võib lugeda, et

parkide tootmise üheaegsus on praktiliselt üks. Toodetav energia vähendab alajaama ja sealt väljuvate fiidrite vaates tarbimist, kuna osa toodetavast energiast tarbitakse ära kohe kliendi lähedal.

4.3 Elektriautode mõju

Rahvusvaheline Energiaagentuur (IEA) ennustab oma "Stated Policies Scenario" kohaselt, et aastaks 2030 suureneb elektrisõidukitega sõitvate inimeste arv 10 miljonilt 2020. aastal 125 miljonile [4]. Sellest tulenevalt on elektrivõrgu planeerijatel tarvis kohaneda olukorraga ja võtta seda enda töös arvesse. Kohati tuleb muuta senini kasutusel olnuid planeerimisel arvesse võetuid üheaegsustegureid ning määrata olukorrale vastavad [27].

4.3.1 Kaasnevad probleemid elektriautode lisandumisel võrku

Kui suurt hulka elektriautosid laetakse samal ajal võivad elektrivõrgus tekkida probleemid, näiteks pinge ja sageduse kõrvalekalded, lisaks sellele veel harmooniliste summaarse moonutusteguri (THD) ja tipukoormuse väärtuste suurenemine võrgus [28].

Suure hulga elektriautode lisandumine elektrivõrku võib kaasa tuua võrgu planeerijatele rida väljakutseid, mida lahendada. Uuringus [29] analüüsiti elektriautode ajatamata laadimise mõju jaotusvõrgule, kui võrgus on 1200 tarbijat. Autorid leidsid, et jaotusalajaama transformatori koormus suurenes ligikaudu 60% kuni 110%, kui võrku lisati vastavalt 15% kuni 30%-le tarbijatest elektriautod. Selle põhjuseks peeti elektriautode laadimise ja elanikkonna tiputarbimiste nõudluse samaaegsust õhtuti. Seega on jaotusvõrgu planeerijatel tarvis otsustada, kas ja mil määral edaspidi arvestada jaotusalajaama transformatori valimisel elektriautode lisandumisega.

4.3.2 Elektrisõidukite reaalse üheaegsusteguri määratlemine

Reaalse üheaegsusteguri määratlemine elektrisõidukite puhul on keeruline, kuna see sõltub nii tehnilistest kui ka käitumuslikest teguritest. Tehnilised tegurid hõlmavad laadimisvõimaluste arvu, mida kasutajatele pakutakse, auto aku suurust ja laadimisvõimsust, mida toetavad laadimisseadmed. Käitumuslikud tegurid on seotud nii kasutajate psühholoogiaga, kus näiteks sõiduulatus hirm võib muutuda, kui EV-d muutuvad tavapärasemaks, kui ka turuteguritega, kus mitmed nn nutika laadimise pakkumised püüavad EV laadimiskoormust päeva jooksul jaotada, kasutades ajatasusid või stiimuleid [30].

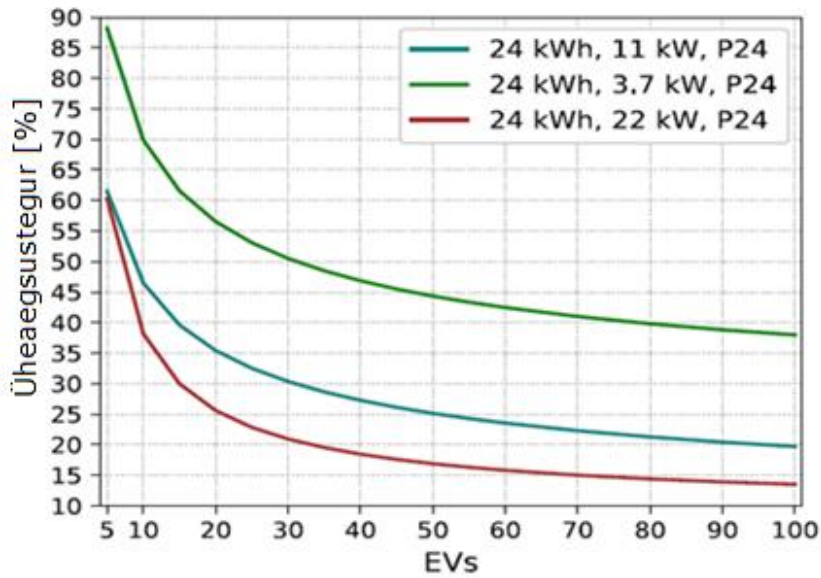
4.3.2.1 Tehnilised tegurid

Elektriauto laadimise tõenosust ehk laadimise üheaegsust mõjutavad mitmed eelpool mainitud tehnilised tegurid. Enne elektriautode laadimiskoormuste modelleerimist tuleb iga elektriauto ja selle laadimispunkti vahelise ühenduse jaoks määratleda tegelik laadimisvõimsus. Seetõttu tuleb võrgupiirkonnas, sõltuvalt saadaolevast eramajade laadimisinfrastruktuurist, võtta arvesse eramajade paigaldatud laadimisvõimsust - eraparkimis- või pigem laadimisvõimalused sõltuvad oluliselt elamutüübist [19].

Laadimise tõenäosus väheneb koos arvestatavate sõidukite arvuga ja laadija suurusega, mis omakorda viib lühema laadimisajani. Näiteks üheaegsusteguri arvutamine 100 elektriauto (Joonis 4.3) kohta annab teguri väärtuseks 38% kasutades 3,7 kW laadijat, 20% kasutades 11 kW laadijat ja umbes 14% 22 kW laadija korral, kui arvestada laadimisnõudluseks kokku 24 kWh. Kui laadimisvõimsust vähendada 11 kW-lt või 22 kW-lt 3,7 kW-le, siis suureneb üheaegsustegur vastavalt 16% ja 23% võrra. Siiski, kui võrrelda 3,7 kW laadijat 11 kW ja 22 kW laadijatega, väheneb tippnõudlus vastavalt ligikaudu 40% ja 60% võrra [30].

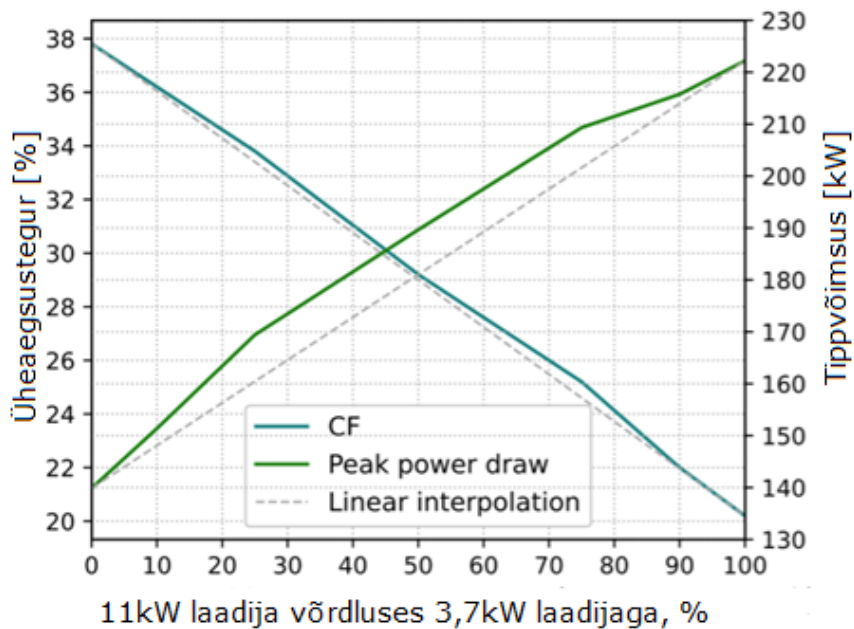
Üheaegsustegurid vähenevad kiiresti alla 30%, kui arvestatakse rohkem kui 30 sõidukit, ja alla 25%, kui kaalutakse rohkem kui 50 sõidukit 11 kW laadimise korral [30]. Veelgi suurema arvu sõidukite korral ei ole üheaegsusteguri vähenemine enam nii järsk ja toimub teatav stabiliseerumine.

Kõrgema laadimisvõimsuse korral muutub küll üheaegsustegur madalamaks, kuid elektriautode laadimiskoormus kipub kogunema lühema aja jooksul, moodustades järsu nõudluskõvera ja tekitades kõrgema tippkoormuse. Selline omadus on ilmekam laadimismustrite puhul, mis kalduvad laadimist koguma, eriti ajatatud laadimise puhul [31].



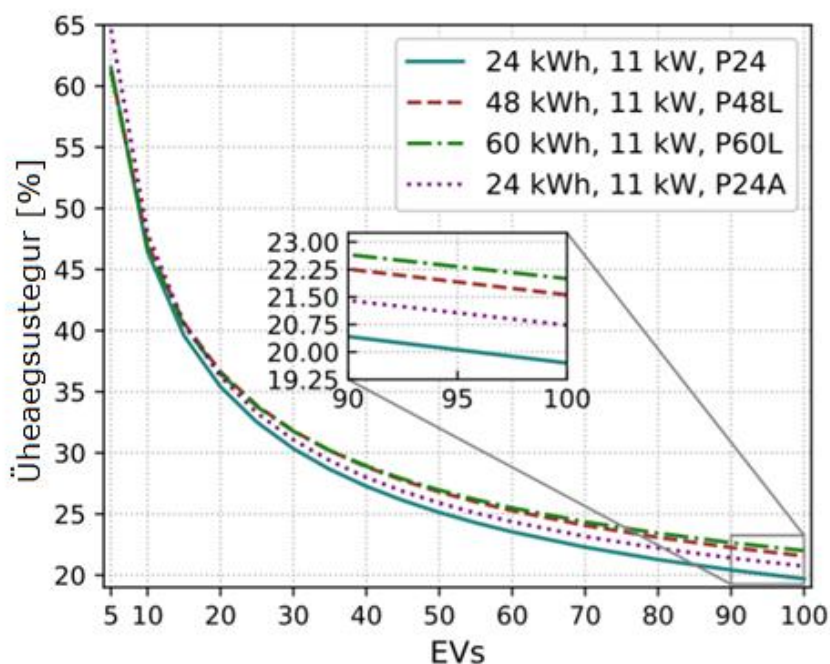
Joonis 4.3. Elektriautode üheaegsusteguri sõltuvus laadimisvõimsusest [30]

Reaalses olukorras omavad ja kasutavad tarbijad elektrivõrgus mõlemaid – nii 3,7kW kui 11kW võimsusega laadijaid. Joonis 4.4 on leitud, kuidas muutuvad üheaegsustegur ja tipuvõimsus, kui võrgus omavad 3,7kW ja 11kW laadijad erinevat osakaalu. Antud väärtused on saadud 100 laadija korral. Sellest järeldub, et mida rohkem on võrgus suurema võimsusega laadijaid, seda madalam on laadimise üheaegsus.



Joonis 4.4 Üheaegsusteguri ja tipukoormuse sõltuvus 3,7kW ja 11kW laadijate erineva osakaalu korral võrgus [30]

Üheaegsustegur sõltub oluliselt elektriautode arvust. Teisalt, sõidu stiilist ja aku suurusest sõltub üheaegsustegur suhteliselt vähe. Kui arvestada mitme parameetriga, nagu elektriauto aku suurus ja määratud laadimisvõimsus, siis ei muutu fiidri aktiivvõimsus lineaarselt. Nagu näha Joonis 4.5, siis on üheaegsustegur vähem tundlik aku mahutavusele. Siiski on 60kWh akuga elektriautode üheaegsustegur võrreldes teistega suurim ja suurendades aku mahutavust 24kWh-lt 60kWh-le suureneb üheaegsustegur 100 sõiduki korral umbes 2% [30].



Joonis 4.5. Elektriautode laadimiste samaaegsus sõltuvalt auto aku mahutavusest [30]

Ühe konkreetse elektriauto poolt antud ajahetkel vajalik tegelik võimsuse hulk sõltub elektriauto mudelispetsiifilisest laadimiskõverast. Kõver omakorda sõltub laadimisprotsessi alguses ja lõpus olevatest aku laetuse (SOC) väärtustest. Analüüside jaoks eeldatakse sageli, et laadimine toimub pideva laadimisvõimsusega kogu laadimisperioodi vältel. Siiski ei ole laadimiskõver tegelikkuses konstantne, vaid sõltub erinevatest parameetritest nagu aku vanus, SOC või aku temperatuur [32].

4.3.2.2 Käitumusliku tegurid

Iga elektrisõiduki kasutaja käitumise modelleerimisel tuleb käsitleda järgmiseid tegureid [30]:

- 1) Sõidumustrid, mis hõlmavad kasutaja saabumise aega ja päevast energiakasutust;
- 2) Tõenäosus, et kasutaja saabumisel alustatakse koheselt laadimisega;

3) Avaliku laadimise infrasüsteemi olemasolu.

Elektriautode laadimiskoormusel on erinevad mustrid ja see põhjustab erinevat mõju elektrisüsteemile erinevate laadimiskeemide korral. Kontrollimatu laadimise juhtudel langeb tippkoormus kokku nädalapäeva öhtutel aset leidva elektrikoormuse tipptundidega, mis võib elektrisüsteemi veelgi koormata. Siiski esineb halvem olukord ajatatud laadimise stsenaariumis. Kuigi laadimine algab ajatatud laadimise korral pärast kella 21, kui algne elektrikoormus hakkab vähenema, toimub enamus laadimisest samal ajal ning elektriautode laadimiskoormuse tõus kella 21-st kuni 23-ni on nii järsk, et see põhjustab vastava tõusu kogu elektrikoormuses. Börsihinna alusel laadimine nihutab teatud määral enamuse laadimisnõudlust öise elektrisüsteemi madala nõudluse perioodile. Siiski koonduvad enamus laadimisest madalate elektrihindadega tundidesse ja see tekitab vastava ajaperioodi jooksul kõrge elektrikoormuse [31].

4.3.2.3 Hooajalised tegurid

Laadimise tõenäosust mõjutavad hooajalised erinevused, tõenäoliselt tingituna suurenenud tarbimisest tehtavate valikute ja üldiselt suurema tarbimise tõttu külmemate ilmastikutingimuste korral. Suvepuhkuste ajal on näha ka madalamaid üheaegsustegureid [33].

Ilkka Jokinen ja Matti Lehtonen uurisid Soome näitel [27] elektriautode laadimiskoormuse üheaegsust erinevates asukohtades arvestades saadaval olevat laadimise võimsust ja ümbritsevat temperatuuri kui piirkonnas on rohkelt elektrisõidukeid. Tabel 4.1 esitatakse erinevates laadimiskohtades keskmised üheaegsustegurid vastavalt ümbritsevatele temperatuurile erinevate laadimisstsenaariumite puhul. Laadimisstsenaariumeid oli kolm – madal, keskmine ja kõrge ning iga stsenaariumi laadimisvõimsused on esitatud Tabel 4.2.

Tabel 4.1. Keskmised üheaegsustegurid vastavalt ümbritsevale temperatuurile erinevate laadimisstsenaariumite korral. [27]

Asukoht	Ümbritseva õhu temperatuur								
	15°C			-5°C			-20°C		
	Laadimisstsenaarium			Laadimisstsenaarium			Laadimisstsenaarium		
	Madal	Keskmine	Kõrge	Madal	Keskmine	Kõrge	Madal	Keskmine	Kõrge
Kodu	0,190	0,122	0,088	0,248	0,159	0,124	0,283	0,187	0,141
Töökoht	0,306	0,201	0,152	0,389	0,261	0,205	0,437	0,297	0,234
Ostlemine	0,053	0,041	0,033	0,076	0,056	0,037	0,085	0,066	0,040
Sugulaste või sõprade külastus	0,151	0,099	0,076	0,186	0,130	0,100	0,206	0,148	0,114
Suvila või puhkemaja	0,166	0,085	0,074	0,202	0,146	0,090	0,248	0,165	0,116
Hotell või motell	0,246	0,189	0,113	0,349	0,241	0,142	0,349	0,264	0,160
Kiirlaadimine	0,044	0,016	0,016	0,109	0,089	0,060	0,177	0,117	0,101

Tabel 4.2. Elektriautode laadimisvõimsused sõltuvalt asukohast erinevate stsenaariumite korral [27]

Asukoha tüüp	Laadimise võimsus erinevate stsenaariumite korral (kW)		
	Madal	Keskmine	Kõrge
Kodumajapidamine	3,68	7,36	11
Töökoht	3,68	7,36	11
Ostlemine	7,36	11	22,1
Sugulaste või sõprade külastus	3,68	7,36	11
Suvila või puhkemaja	3,68	7,36	11
Hotell või motell	7,36	11	22,1
Kiirlaadimine	50	50	100

Laadimise üheaegsus suurenes madalama saadaoleva laadimisvõimsuse ja madalama ümbritseva temperatuuri korral. Asukohatüübi järgi olid kõrgeimad üheaegsustegurid töökohal, hotellis ja kodus. Siiski ei ületanud tegurid kunagi 0,437 (töökoht), mis näitab, et kui piirkonnas on suur elektriautode hulk, siis on laadimise üheaegsus suhteliselt madal, isegi temperatuuril -20°C. Kui kaalutakse näiteks kohta, kus on väike arv elektrisõidukeid, siis laadimise kõikumine võib olla suur ja seega võib ka laadimise üheaegsus olla kõrge [27].

4.3.3 Mõju madalpingevõrgule

Vastavalt vastu võetud kliimaeesmärkidele, arengukavadele ja regulatsioonidele muutub ühiskond aina elektrifitseeritumaks. Eelpool mainitud elektritootmise- ja tarbimisseadmed on edaspidi põhilisteks elektri koormusgraafikute kujundajateks. Eriti oluline on mõista, kuidas nad kõik koos võrku mõjutama hakkavad. Selleks aga tuleb kõigepealt analüüsida, millist mõju nad igaüks võrgule avaldavad ja milliseid tähtsamaid parameetreid seejuures tuleb jälgida.

Elektrivõrgu planeerijate/ süsteemi operaatorite jaoks on oluline aru saada, kuidas elektritransport mõjutab võrgu vajadusi lähemate kümnendite jooksul. Põhiline nõudlus tuleneb erasektorist, mis vajab kõige kulukamaid võrgu investeeringuid [30].

Elektrivõrgu käitamise ja planeerimise ning eriti just võrgu planeerimise jaoks on laadimise üheaegsus oluline aspekt. Teades sõidukite osakaalu, mis laevad samal ajal, ja tipplaadimisvõimsust, saab laadimisvõimsuse vajaduse määrata nii, et täita laadimisnõudlust [27]. Laadimisvõimsuse reguleerimine on võimalik, kasutades laadimisaja paindlikkust. Seda laadimisvõimsuse reguleerimist nimetatakse võrku toetavaks laadimiseks [11].

5. STSENAARIUMID ÜHEAEGSUSTEGURI MÄÄRAMISEKS

Vaadeldava piirkonna elektriautode mõju analüüsimiseks madalpingevõrgule on koostatud kolm erinevat stsenaariumit. Stsenaariumite loomisel on lähtud nii eelpool välja toodud teadusartiklitest, kui arengukavades välja toodud eesmärkidest. Teaduspublikatsioonidest on hästi leitavad erinevad tehnilised parameetrid, mida kasutada antud töös simulatsioonide teostamisel. Samas arengukavadest on näha põhjuseid, miks antud stsenaariumites välja toodud valikud on tehtud.

Loodud kolmes stsenaariumis uuritakse põhiliselt kolme asjaolu:

- Kuidas muutub üheaegsustegur madalpingevõrgus, kui võrku lisandub erinevas koguses elektrisõidukeid?
- Millist mõju avaldab võrgu üheaegsustegurile erinevate laadimisvõimsuste kasutamine?
- Kuidas erineb autode üheaegne laadimine olukorrast, kus sõidukeid laetakse erinevatel aegadel?

Igas stsenaariumis vaadeldakse erinevas koguses elektrisõidukite lisandumist võrku, erineb vaid kasutatava laadija võimsus – esimeses stsenaariumis kasutatakse ainult 11kW laadijat, teises ainult 3,7kW laadijat ja kolmandas nii 11kW kui 3,7kW laadijaid erinevates osakaaludes.

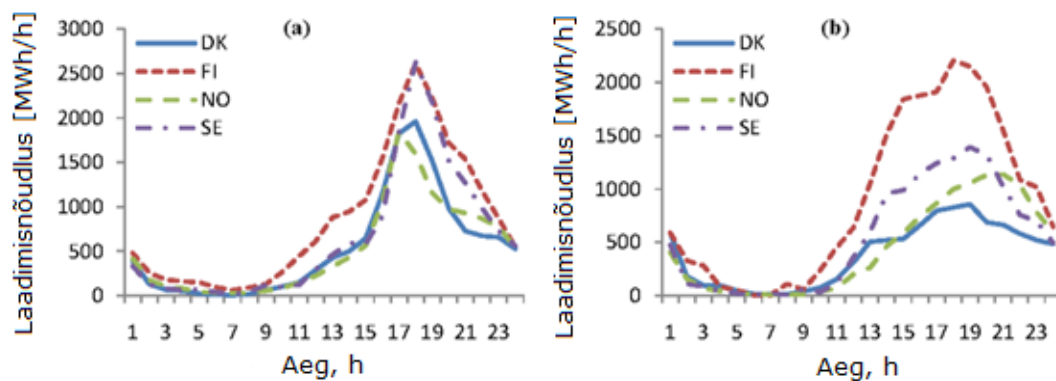
5.1 Stsenaarium 1

Elektriautode mõju hindamiseks elektrivõrgu üheaegsustegurile on vastavalt arengukavadele ja teadusuuringutele välja mõeldud kolm erinevat stsenaariumit ja neid DIGSILENT PowerFactory tarkvaraga simuleeritud. Üheaegsustegureid on vaadatud eraldi nii alajaama kui fiidrite põhiselt. Esimeses stsenaariumis on olukorra simuleerimiseks välja valitud järgmised parameetrid:

- Elektriauto laadija võimsus on 11kW, mis on vastavalt eelpool nimetatud artikli põhjal [16] tüüpiline kodulaadija võimsuseks.
- Elektriauto aku energiamahutavus on 24kWh. Vastavalt Joonis 4.5 ei oma aku mahutavuse erinevus suurt mõju üheaegsusteguri väärtusele. Kuna artiklis [30] on kasutatud elektriauto laadimise üheaeguste määramisel just 24kWh akudega

autosid ja kuna antud töös seda analüüsi kasutatakse, siis on simuleerimiseks kasutatud just nii suure akuga autosid.

- Elektriauto laadima panemise ajaks on valitud kell 18.00. Vastavalt Taani Tehnikaülikooli leitud uuringule [31] jääb kontrollimatu laadimise tipp Põhjamaades 11kW kodulaadija korral nii nädala sees kui nädalavahetustel ajavahemikku 17.00-19.00 (Joonis 5.1).
- Elektriauto aku laetuse protsent on 100% ehk tarbija laeb igaks päevaks aku täielikult täis.



Joonis 5.1 Laadimise nõudlus Põhjamaades 11kW laadimisvõimsusega laadija puhul a) tööpäeviti ja b) nädalavahetustel [31]

Esimeses olukorras lisatakse igale tarbija liitumispunktile elektriauto laadimise võimekus arvestades, et elektriautosid laetakse samal ajal ja vaadatakse, kuidas muutub alajaama tarbimiskõver kui elektriautode laadimispunkte on võrgus 50%, 75% ja 100% vaadeldava võrgu liitumispunktide arvust. 50% osakaalu korral on võrku ühendatud 23 laadimispunkti, 75% korral 35 laadimispunkti ja 100% korral kõik 46 laadimispunkti (Tabel 5.1). Siinkohal tuleb märkida, et kirjeldatud laadimispunktide osakaalud 50% ja 75% on ligikaudsed, kuna selleks, et olukordi oleks võimalik simuleerida, tuleb lisatavad laadimispunktid ümardada täisarvudeni. Seega kohati ei ühti tarbijate arv täpselt 50% või 75%-ga.

Teises olukorras kasutatakse elektriauto laadimise üheaegsustegurid ja simuleeritakse olukorda uute andmete põhjal ja leitakse uued alajaama üheaegsustegurid. Elektriauto laadimiste üheaegsustegurid on saadud peatükis 4.3 kirjeldatud Joonis 4.3, mis on omakorda koondatud Tabel 5.2.

Fiidri üheaegsusteguri leidmisel analüüsitakse samasuguseid olukordi nagu alajaama puhul ja arvutatakse uued üheaegsustegurid vastavalt laadimise üheaegsust arvestamata ja arvestades. Kuna mitmel fiidril on tarbijate arv sarnane või väga väike, siis ei analüüsita kõiki fiidreid, vaid välja on valitud fiidrid F2 ja F5.

Tabel 5.1 Elektrisõidukite arv võrgus erinevate osakaalude korral

	EV arv võrgus 50% korral	EV arv võrgus 75% korral	EV arv võrgus 100% korral
Alajaam	23	35	46
F2	5	7	9
F5	7	11	14

Tabel 5.2 EV laadimise üheaegsustegurid 3,7kW ja 11kW laadijate korral

EV kogus	Üheaegsustegur 3,7kW laadijate korral	Üheaegsustegur 11kW laadijate korral
1..4	1	1
5	0,85	0,60
10	0,70	0,45
15	0,62	0,38
20	0,56	0,35
25	0,52	0,32
30	0,50	0,30
35	0,48	0,28
40	0,46	0,27
45	0,45	0,26

5.2 Stsenaarium 2

Nagu esimeses stsenaariumis, siis ka järgmises tuleb kõigepealt ära kirjeldada vastavad parameetrid, mida simuleerima hakatakse:

- Elektriauto laadija võimsus on 3,7kW, mida kasutatakse olukorras, kus tarbijal on võimalik kasutada ainult ühe faasilist süsteemi.
- Elektriauto aku energiamahutavus on 24kWh.
- Elektriauto laadima panemise ajaks on valitud kell 18.00.
- Elektriauto aku laetuse protsent on 100% ehk tarbija laeb igaks päevaks aku täielikult täis.

Nagu näha, siis võrreldes esimese stsenaariumiga on tehtud kõigest üks muudatus ja 11kW laadija asemel kasutatakse 3,7kW laadijat. Alajaama üheaegsustegur leitakse

eelmisele stsenaariumile sarnaselt erinevate elektriauto osakaalude korral arvestamata ja arvestades tarbija käitumist ehk laadimise üheaegsust.

5.3 Stsenaariumi 3

Töö kolmandas stsenaariumis uuritakse olukorda, kus võrgus on nii 3,7kW kui 11kW elektriauto laadijaid. Ülejäänud parameetrid on samad, mis eelnevates simulatsioonides:

- Elektriauto laadija võimsus on 3,7kW või 11kW.
- Elektriauto aku energiamahutavus on 24kWh.
- Elektriauto laadima panemise ajaks on valitud kell 18.00.
- Elektriauto aku laetuse protsent on 100% ehk tarbija laeb igaks päevaks aku täielikult täis.

Uuritakse olukordi, kus igale tarbijale on lisatud elektriauto laadimise võimekus ja simuleeritakse kolme erinevat alamstsenaariumit:

1. Võrgus on 25%-l tarbijatest 11kW võimsusega laadija ja ülejäänud 75%-l 3,7kW laadija.
2. Võrgus on 50%-l tarbijatest 11kW võimsusega laadija ja teisel 50%-l 3,7kW laadija.
3. Võrgus on 75%-l tarbijatest 11kW võimsusega laadija ja ülejäänud 25%-l 3,7kW laadija.

Kõik kolm alamstsenaariumi simuleeritakse olukorras, kus tarbijad panevad elektriautod samaaegselt laadima ja olukorras, kus nende laadimiste üheaegsus on saadud vastavalt peatükis 4.3 toodud Joonis 4.4. Jooniselt saadud üheaegsustegurid ja simuleerimisel kasutatud laadijate arvud on koondatud Tabel 5.3. Joonisel esitatud tulemused on saadud 100 elektriauto kohta, mistõttu on kasutatud koefitsienti, kuna vaadeldavas alajaamas on tarbijaid tunduvalt vähem ehk 46. Koefitsient on omakorda leitud Joonis 4.3 kasutades. Nimelt on antud graafikult võetud 3,7kW ja 11kW laadijate üheaegsustegurid vastavalt autode arvule, vaadatud palju need erinevad samal graafikul olevast olukorrast, kus võrgus on 100 autot ja võetud nende tulemuste suhe ning liidetud see Joonis 4.4 saadud tulemusele.

Tabel 5.3 11kW ja 3,7kW laadijate arv ja kasutatud EV laadimise üheaegsustegur erinevate alamstsenaariumite korral

	EV laadimise üheaegustegur	3,7kW laadijate arv alajaamas	11kW laadijate arv alajaamas
EV laadijate 25/75 osakaal	0,41	35	11
EV laadijate 50/50 osakaal	0,36	23	23
EV laadijate 75/25 osakaal	0,32	11	35

6. VAADELDAVA PIIRKONNA MODELLEERIMINE VALITUD STSENAARIUMITE ALUSEL

Käesolevas peatükis kirjeldatakse vaatluse all olevat piirkonda ning leitakse baasväärtused, millest antud töös lähtutakse. Samuti tuuakse välja modelleerimisel saadud tulemused loodud stsenaariumite kasutamisel.

6.1 Vaadeldava piirkonna kirjeldus

Üheaegsusteguri analüüsimiseks on aluseks võetud 10/0,4 kV jaotusalajaama andmed koos sinna kuuluva madalpingevõrgu ja selle parameetritega. Tegemist on Saue vallas asuva uusarendus piirkonnaga, kus kuue madalpingefiidri vahel on ära jaotatud 46 tarbijat. Lisaks sellele on võrgus kaks elektritootjat – päikeseelektrijaama, võimsustega 6,6kW ja 5kW. Tarbijate peakaitsete suurused jäävad vahemikku 3x16A-3x25A ja alajaamas on trafo võimsusega 400kVA.

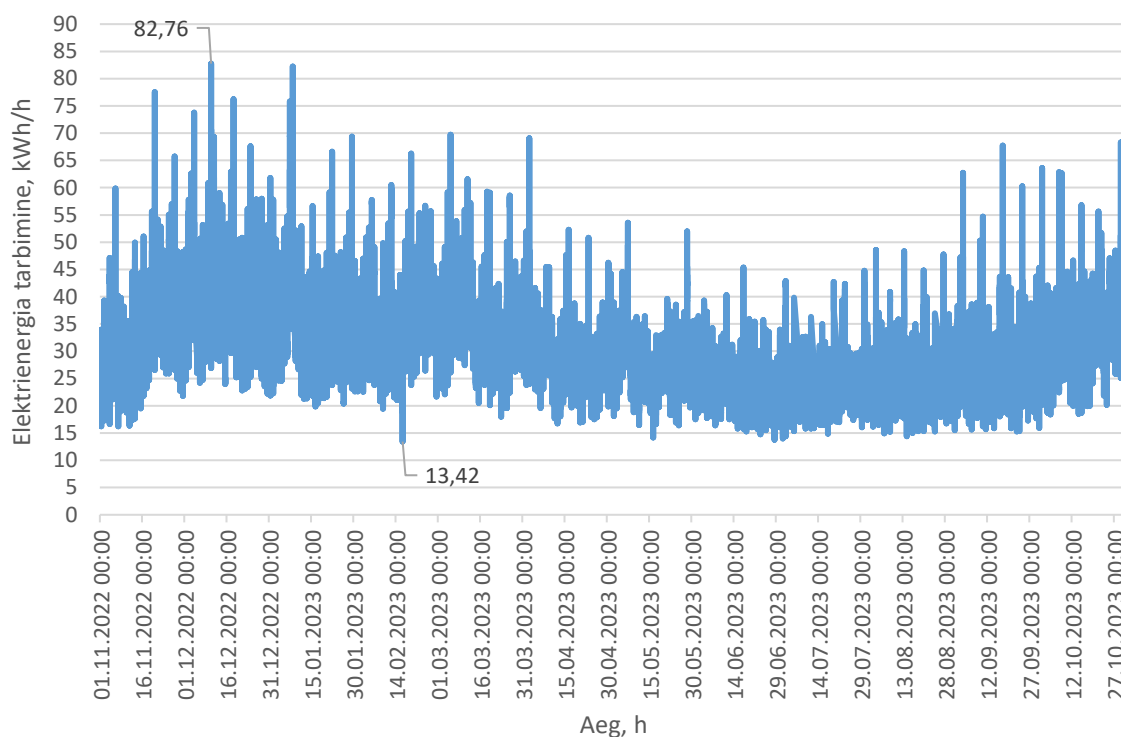
Madalpingevõrgu mõõtmistulemused ja tehnilised andmed

Üheaegsusteguri uurimiseks valitud piirkonnas on Elektrilevi OÜ-lt saadud tunnipõhised elektritarbimise andmed fiidrite kaupa. Vaadeldava perioodi pikkuseks on üks aasta – ajavahemik 01.11.2022 – 31.10.2023. Fiidrite F1, F2, F5 ja F6 peakaitsete suurused on 160A ning fiidrite F3 ja F4 vastavalt 125A (Tabel 6.1). Alajaama fiidritelt algavad madalpingeliinid on välja ehitatud kasutades AXPK tüüpi maakaablit. Alajaama ja jaotuskilpide vahel on kasutatud kaablit ristlõikega 240 mm², jaotuskilpide ja liitumiskilpide ning tarbimispunktide vahel ristlõigetega 16 ja 25 mm².

Tabel 6.1. Vaadeldava piirkonna andmed fiidrite kaupa

Fiider	Liitumispunktide arv	Peakaitsete suurus, A	Suurim mõõdetud tunnitarbimine, kWh/h	Liitumispunktide peakaitsete summa, A
F1	10	160	29,45	202
F2	9	160	18,91	170
F3	5	125	18,62	110
F4	6	125	8,21	145
F5	14	160	38,08	321
F6	2	160	6,16	45
Alajaam	46	-	82,75	993

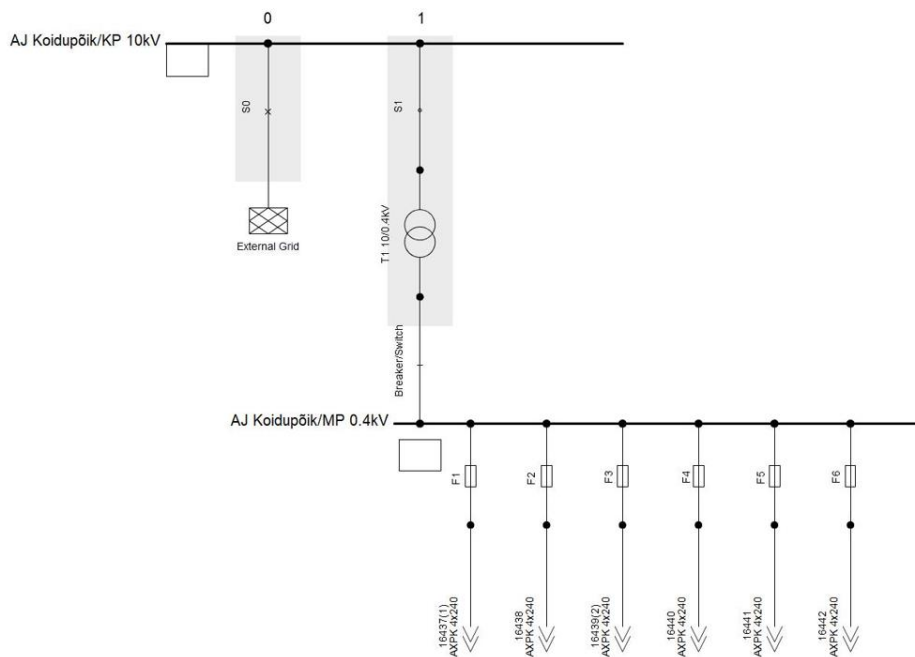
Vaadeldava perioodi maksimaalne tunnitarbimine alajaamas oli 82,75 kWh/h, mis mõõdeti 10.12.2022 kell 19.00 (Joonis 6.1). Vaadeldes fiidrite mõõtetulemusi eraldi, siis suurim tarbitav võimsus 38,08 kWh mõõdeti fiidril F5 02.04.2023 kell 18.00.



Joonis 6.1 Tarbijate elektrienergia tarbimine alajaamas vaadeldaval perioodil

6.2 Mudeli koostamine

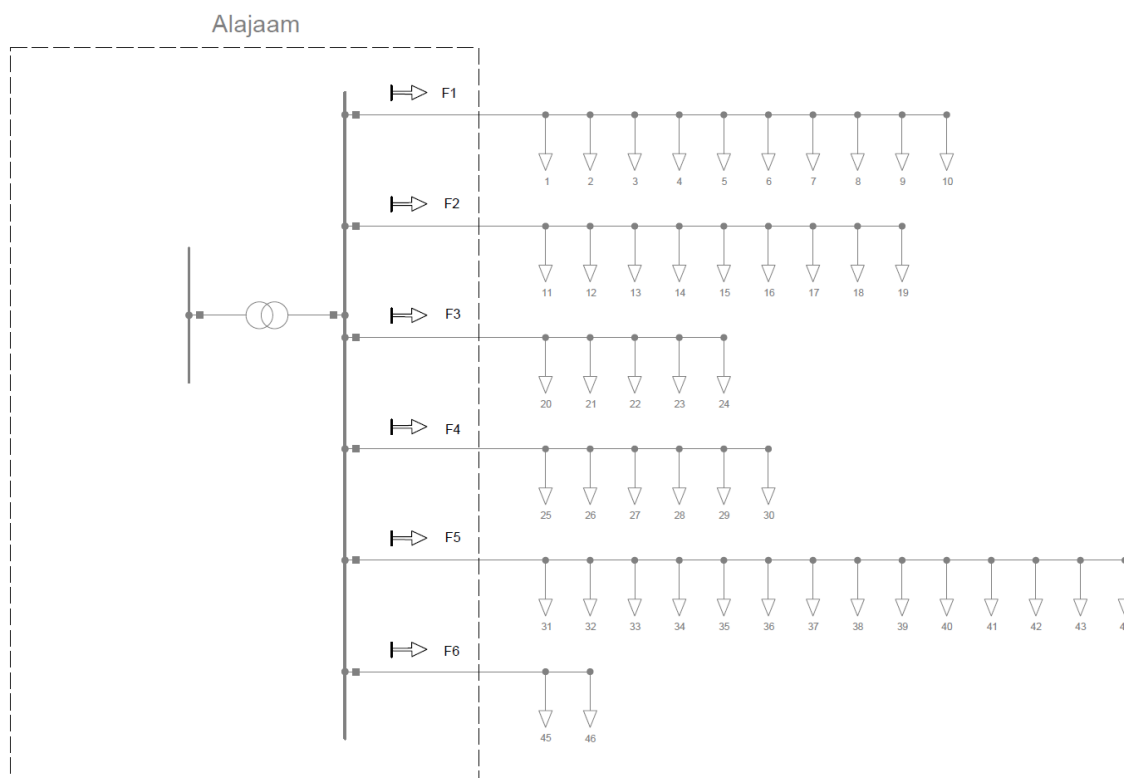
Vaadeldava piirkonna mudeli koostamisel kasutati Elektrilevi OÜ poolt saadud reaalseid madalpingevõrgu- ja tarbimisandmeid. Võrk on kirjeldatud alates alajaamast. Alajaamas on kirjeldatud trafo koos madalpinge poolel olevate väljundfiidrite ja nende peakaitsete suurustega (Joonis 6.2). Sealt väljuvad liinid on kirjeldatud kuni liitumiskilpideni koos vahepeale jäävate jaotuskilpidega. Liitumiskilpidest edasi minevaid tarbijale kuuluvaid liine ei ole tarkvaras kirjeldatud ehk tarbimispunkt on näidatud liitumiskilpidesse.



Joonis 6.2 Alajaama mudel tarkvaras PowerFactory

Uuritava piirkonna elektrivõrgu skeem on toodud Joonis 6.3. Elektrivõrgu simuleerimisel kasutati Quasi-Dynamic simulation paketti, mis laseb kasutajal sooritada mitmeid võimsusvoo arvutusi kindlaks määratud ajaperioodi jooksul. Tänu antud funktsioonile sai simuleerida Elektrilevi OÜ poolt antud tarbimisandmeid ajavahemikul 01.11.2022 – 31.10.2023.

Tarbimisandmete täpsemaks modelleerimiseks on võimalik programmile PowerFactory csv-failiga ette anda koormusgraafik, seega on Elektrilevi OÜ-lt saadud iga tarbija aastane koormusgraafik lisatud mudelisse ja olukordi simuleeritud reaalsete tarbimisandmete põhjal.



Joonis 6.3. Uuritava madalpingevõrgu aseskeem DIgSILENT PowerFactory programmis

6.2.1 Madalpingevõrgu modelleerimine DIgSILENT PowerFactory tarkvaraga

Uuritava piirkonna analüüsimiseks kasutati madalpingevõrgu simuleerimiseks DigSilent PowerFactory tarkvara. Arvutusprogramm PowerFactory ettevõttelt DIgSILENT on ülekande- ja jaotusvõrkude ning tööstuslike elektrivõrkude analüüsimiseks kasutatav arvutipõhine inseneri tööriist. Kasutajate elektrisüsteemi analüüsimise vajaduse rahuldamiseks loodi ta tööriistana, mis pakub laialdasi elektrisüsteemi analüüsimise funktsioone ühes kohas. Programm kasutab ühte andmebaasi, kus on kõik seadmete jaoks vajalikud andmed (liiniandmed, generaatori andmed, kaitseseadmete andmed, kontrollrite andmed jne), mis tähendab, et ta suudab sooritada kõik simulatsioonid ühes keskkonnas, nagu näiteks koormusvoo analüüs, lühisvoolu arvutamine, harmooniliste analüüs, stabiilsuse analüüs [34].

6.2.2 Elektriauto kirjeldamine tarkvaras

Elektriautode poolt tarbitava energia simuleerimiseks loodi Powerfactory programmis igale tarbimispunktile uus elektriauto laadimist kirjeldav tarbimispunkt. Laadimispunkti loomisel tuli määrata järgmised parameetrid:

- Kiirlaadimise võimekus – EI/JAH

- Kiirlaadimise maksimaalne võimsus – MW
- Tavalise laadimise maksimaalne võimsus – MW
- SOC (state of charge) ehk elektriauto aku laetuse tase - %
- Aku energiamahutavus – MWh
- Varaseim aeg koju jõudmise (24h) - h
- Hiliseim aeg koju jõudmisel (24h) – h

QDS simulatsioonis hakkab elektriauto mudel laadima antud ajavahemikus, mis jääb kasutaja määratud varasema ja hilisema saabumisaja vahele. Algusaeg valitakse mudeli poolt iga uue päeva jaoks juhuslikult määratud ajavahemiku piires, kasutades ühtlast jaotust.

Kasutaja saab määrata, kas laadimisjaam toetab kiirlaadimist ja täpsustada vastava võimsuse. Elektriauto aku energiamahut on määratud parameetriga "Eini" MWh-s. Erinevate sõidukite jaoks varieeruva läbisõidu kirjeldamiseks määratakse aku laetuse tase laadimise alguses (SOC) juhuslikult. Kui maksimaalselt lubatud SOC on saavutatud, st kui elektriauto on täielikult laetud, jääb aku sellele tasemele. Järgmise päeva saabumisel määratakse aku laetuse tase taas juhuslikult.

6.3 Elektriauto laadimise simuleerimine valitud piirkonnas

Elektriauto mõju hindamiseks vaadeldava madalpingevõrgu üheaegsustegurile uuritakse üheaegsustegureid alajaama ja fiidrite põhisel. Alajaama ja fiidrite üheaegsustegurite uurimisel on kasutatud Elektrilevi OÜ poolt saadud fiidrite liitumispunktide (tarbijate) tarbimisandmeid.

6.3.1 Alajaama üheaegsusteguri leidmine

Elektrilevi OÜ poolt saadud liitumispunktide tunnipõhiste andmete põhjal on võimalik reaalselt üheaegsustegurit uurida alajaama põhisel. Vastavalt peatükis 2.3 esitatud valemile 2.7 saab vaadeldavas alajaamas antud olukorras leida tunnipõhised üheaegsustegurid järgmiselt:

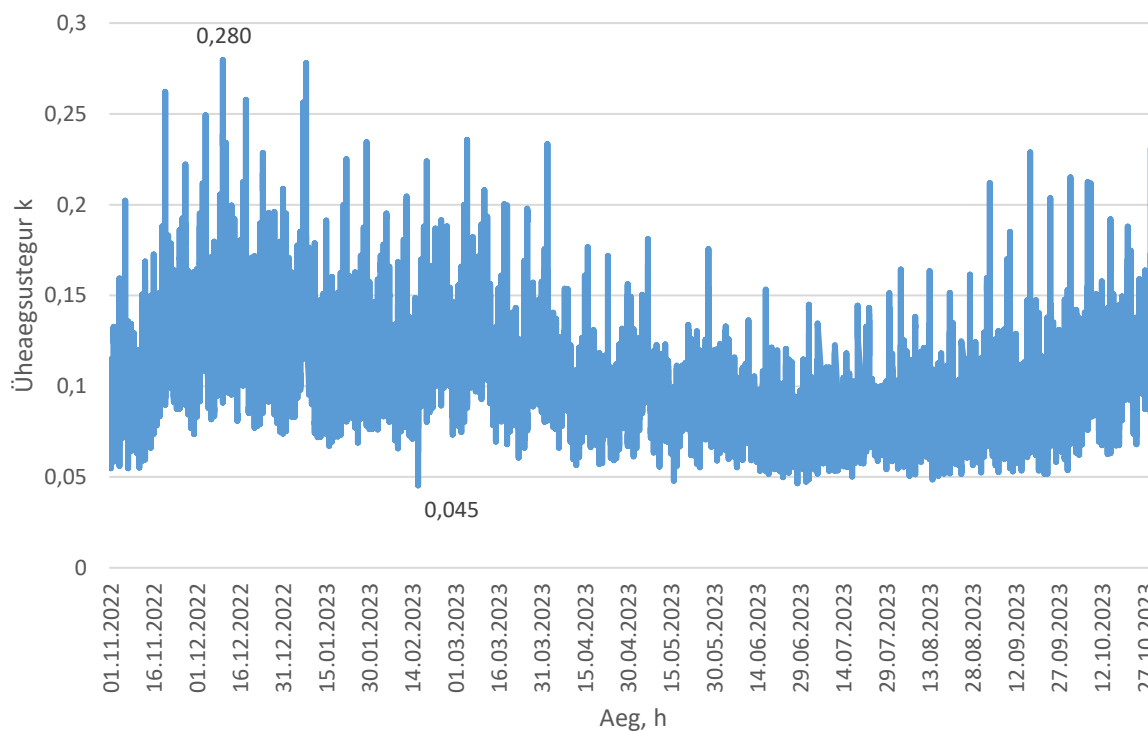
$$k_{AJ} = \frac{P_{maxAJ}}{\sum_{i=1}^n P_{maxLP}}, \quad (6.1)$$

kus n – liitumispunktide arv;

$P_{\max AJ}$ – üheaegne suurim tarbimisvõimsus alajaamas, kWh;

$P_{\max LP}$ – liitumispunktide summeeritud maksimaalne tunnitarbimine vaadeldaval perioodil, kWh.

Siinkohal tuleb märkida, et leitakse reaalne tarbimisandmetel põhinev üheaegsustegur ja antud väärtus ei anna hinnangut alajama planeeritud üheaegsustegurile. Saadud tulemuste põhjal joonistub välja vaadeldava perioodi (1.11.2022-31.10.2023) tunnipõhine alajaama üheaegsusteguri graafik (Joonis 6.4). Antud töös kirjeldatakse saadud graafikut baasolukorra või -stsenaariumina ja kasutatakse edasiste modelleerimiste võrdlemisel kui standardit.



Joonis 6.4 Vaadeldava alajaama tunnipõhised üheaegsustegurid

6.3.2 Fiidri üheaegsusteguri leidmine

Lisaks fiidrite andmetele on Elektrilevi OÜ-lt saadud iga kliendi tarbimisandmed, kes vaadeldavasse alajaama kuuluvad. Nende andmete põhjal on võimalik reaalset üheaegsusteguri uurida fiidri põhiselt. Vastavalt peatükis 2.3 esitatud valemile 2.7 saab vaadeldavates fiidrites antud olukorras leida tunnipõhised üheaegsustegurid järgmiselt:

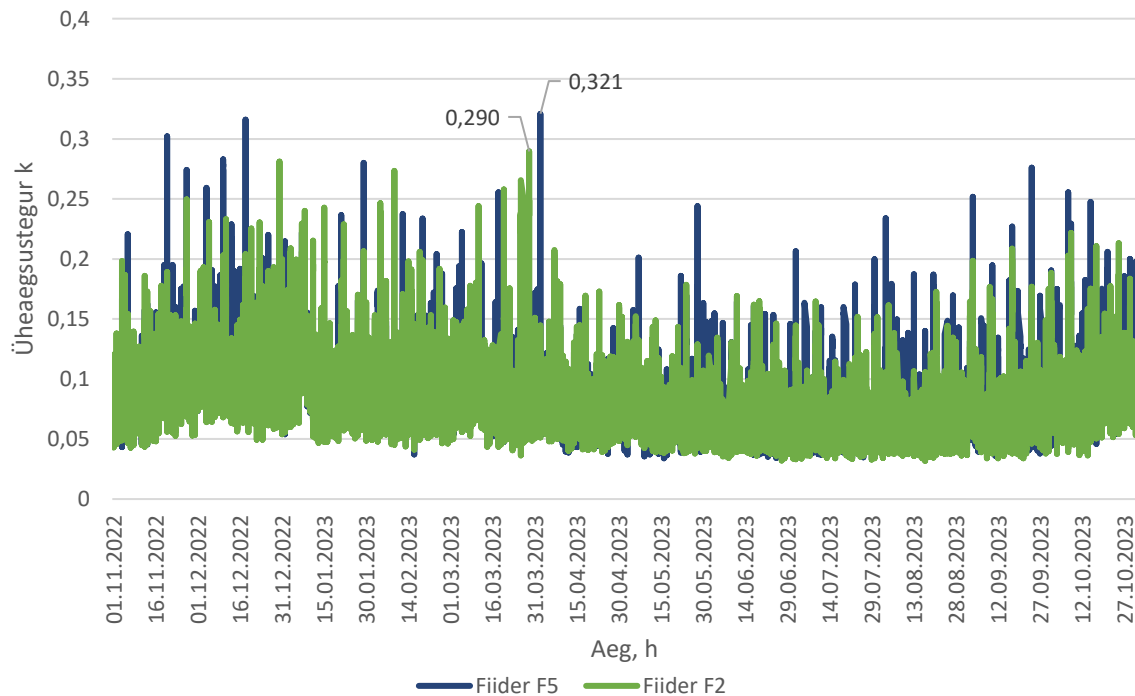
$$k_{fiider} = \frac{P_{maxF}}{\sum_{i=1}^n P_{maxLP}'} \quad (6.2)$$

kus n – liitumispunktide arv;

P_{maxF} – üheaegne suurim tarbimisvõimsus fiidril, kWh;

P_{maxLP} – liitumispunktide summeeritud maksimaalne tunnitarbimine vaadeldaval perioodil, kWh.

Kuna mitmel fiidril vaadeldavas alajaamas on vähe tarbijaid, siis on valitud välja kaks fiidrit – F2 ja F5, kus on tarbijate arv kõige suurem. Saadud üheaegsusteguri väärtuse muutus vaadeldaval perioodil on esitatud Joonis 6.5.



Joonis 6.5 Fiidrite F2 ja F5 tunnipõhised üheaegsustegurid

6.3.3 Stsenaariumi 1 tulemused

Elektrilevi OÜ poolt saadud andmete põhjal on stsenaariumite simuleerimisel leitud maksimaalsed, aasta keskmised ja 50 maksimaalse üheaegsusteguri keskmised tunnipõhised üheaegsustegurid. Esimeses stsenaariumis lisati olemasolevasse madalpingevõrku 11kW võimsusega elektriauto laadijaid ja leiti vastavalt olukordadele uued reaalsed üheaegsustegurid ning koondati need Tabel 6.2.

Tabel 6.2 Alajaama ja fiidrite üheaegsusteguri väärtused lisades tarbimispunktidesse 11kW EV laadija olukorras, kus tarbijad laevad sõidukeid samal ajal

		Baasolukord	EV 50% osakaalu korral võrgus	EV 75% osakaalu korral võrgus	EV 100% osakaalu korral võrgus
Maksimaalne tunnipõhine üheaegsustegur	AJ	0,280	0,602	0,708	0,746
	F2	0,341	0,751	0,796	0,827
	F5	0,321	0,562	0,660	0,702
Aasta keskmine tunnipõhine üheaegsustegur	AJ	0,103	0,086	0,083	0,080
	F2	0,087	0,084	0,078	0,076
	F5	0,085	0,077	0,076	0,072
50 maksimaalse tunnipõhise üheaegsusteguri keskmise väärtus	AJ	0,229	0,550	0,655	0,714
	F2	0,249	0,685	0,740	0,793
	F5	0,240	0,504	0,612	0,648

Antud tulemuste korral on arvestatud, et õhtul kell 18.00 hakkavad kõik võrku lisandunud elektriautod üheaegselt laadima, seega on siinkohal arvestatud laadimise üheaegsusega üks. Tulemustest selgub, et maksimaalne tunnipõhine üheaegsustegur tõuseb olukorras, kus igale tarbijale on lisatud 11kW võimsusega elektriauto laadija kõige enam fiidril F2, kui võrreldes baasolukorraga tõuseb üheaegsustegur 0,486 võrra. Aasta keskmine tunnipõhine üheaegsustegur elektriautode lisamisel aga väheneb, kuna ajavahemik, mil elektriautosid laetakse on lühike võrreldes kogu tundide arvuga aastas ja üheaegsustegurite minimaalsed väärtused muutuvad samuti veelgi väiksemaks.

Selleks, et näha üldisemalt maksimaalse üheaegsusteguri väärtuse muutust on leitud 50 maksimaalse tunnipõhise üheaegsusteguri keskmised väärtused ja neid erinevate olukordade puhul võrreldud. Siit järeldub, et üheaegsusteguri väärtus juhul, kui igale tarbijale lisatakse EV laadimise võimekus suureneb, näiteks alajaama puhul baasolukorraga võrreldes 0,485 võrra, mis on 4,1% võrra kõrgem kui maksimaalse tipu võrdluses. Samuti võib fiidrite tulemustest näha, et 50 maksimaalse üheaegsusteguri keskmised väärtused suurenevad võrreldes baasolukorraga mõneti rohkem, kui üksikud maksimaalsed tipud.

Olukorras, kus võrgus on 50%-l või 75%-l tarbijatest elektriauto, on alajaama maksimaalsed tunnipõhised üheaegsustegurid võrreldes olukorraga, kus on kõigil EV laadimise võimekus vastavalt 0,144 ja 0,038 võrra madalamad. 50 tunni keskmised väärtused on sellisel juhul 0,164 ja 0,059 võrra madalamad, seevastu aasta keskmised üheaegsustegurid on mõnevõrra suuremad, kui võrgus on vähem laadijaid.

Fiidrite analüüsimisel on näha, et võrreldes alajaama reaalse üheaegsusteguritega on fiidrite tulemused juba baasolukorras mõnevõrra suuremad. Antud asjaolu tõestab, et mida rohkem on tarbijaid, seda madalamaks kujuneb üheaegsustegur. Fiidrite üheaegsustegurid tõusevad sarnaselt alajaamale juba olukorras, kus pooltel tarbijatest on elektriauto. Kui lisada igale tarbijale elektriauto, siis selgub, et maksimaalne tunnipõhine üheaegsustegur tõuseb võrreldes baasstsenaariumiga fiidril F2 0,583 ja fiidril F5 0,381 võrra, mis on märkimisväärseks tõusuks. Sarnaselt maksimaalsetele suurustele, suurenesid ka 50 maksimaalse tunnipõhise üheaegsusteguri keskmised väärtused. Nagu näha, siis fiidril F2, kus on vähem tarbijaid, üheaegsustegur suurenes elektriautode lisamisel oluliselt rohkem kui fiidril F5. Aasta keskmised üheaegsustegurid võrreldes baasolukorraga suuresti ei muutunud.

Tõenäosus, et kõik elektriautot omavad kasutajad alajaamas panevad auto üheaegselt laadima on küllaltki madal. Tõenäosus suureneb fiidri üheaegsusteguri vaatlemisel, kuna sellisel juhul on tarbijate arv oluliselt madalam. Siiski tuleks nii alajaama kui fiidrite üheaegsusteguri analüüsimisel adekvaatsemate tulemuste saamiseks arvestada elektriautode laadimise üheaegsusega. Tabel 6.3 on leitud uued alajaama üheaegsustegurite väärtused arvestades tarbijate käitumisega ehk laadimiste üheaegsusega.

Tabel 6.3 Alajaama ja fiidrite üheaegsusteguri väärtused lisades tarbimispunktidesse 11kW EV laadija arvestades EV laadimise üheaegsust

		Baasolukord	EV 50% osakaalu korral võrgus	EV 75% osakaalu korral võrgus	EV 100% osakaalu korral võrgus
Maksimaalne tunnipõhine üheaegsustegur	AJ	0,280	0,449	0,501	0,530
	F2	0,341	0,653	0,653	0,748
	F5	0,321	0,447	0,529	0,563
Aasta keskmine tunnipõhine üheaegsustegur	AJ	0,103	0,104	0,104	0,105
	F2	0,087	0,090	0,086	0,092
	F5	0,085	0,082	0,084	0,086
50 maksimaalse tunnipõhise üheaegsusteguri keskmise väärtus	AJ	0,229	0,371	0,423	0,473
	F2	0,249	0,564	0,603	0,661
	F5	0,240	0,387	0,453	0,477

Tulemustest selgub, et alajaama maksimaalne üheaegsustegur tõuseb olukorras, kus kõigil tarbijatel on 11kW laadija 0,530-ni, mis on baasolukorrast 0,25 võrra kõrgem. Võrreldes Tabel 6.2 saadud tulemusega väheneb maksimaalne üheaegsustegur alajaamas EV 100% osakaalu korral 0,216 ehk ~29% võrra. Aasta keskmised üheaegsustegurid oluliselt ei muutu ja on baasolukorraga praktiliselt võrdsed. 50 maksimaalse tunnipõhise üheaegsusteguri keskmised väärtused vähenevad võrreldes üheaegse laadimisega 0,179-0,241 võrra ehk ~32,5-33,8%. Seega vähenesid maksimaalsed keskmised väärtused mõnevõrra rohkem, kui vaadeldava perioodi lõikes leitud maksimaalne üheaegsustegur.

Fiidrite üheaegsustegurite muutusi vaadates võib täheldada sarnaseid muutuseid nagu alajaama puhul. Kui arvestada, et tarbijad ei lae autosid üheaegselt, siis väheneb fiidril F2 maksimaalne üheaegsustegur 0,125 võrra ja fiidril F5 0,139 võrra ja 50 maksimaalse keskmise üheaegsusteguri vastavalt 0,176 ja 0,171 võrra.

Kokkuvõtvalt võib öelda, et 11kW laadijaga elektriauto laadimine suurendab märgatavalt alajaama ja fiidrite üheaegsustegureid juba olukorras, kus pooltel tarbijatest on elektriauto kasutusel. Suurenev elektriautode hulk enam sedavõrd suurt muutust üheaegsustegurile ei too, samas ei saa seda arvestamata jätta.

6.3.4 Stsenaariumi 2 tulemused

Teises stsenaariumis simuleeritakse olukorda, kus tarbijatel on kasutada ainult 3,7kW võimsusega laadija. Olukorra simuleerimisel saadud tulemused kajastuvad Tabel 6.4. Võrreldes esimese stsenaariumiga, kus kasutati 11kW võimsusega laadijaid on näha, et üheaegsustegurid on väiksemad. Maksimaalne alajaama üheaegsustegur 0,619 mõõdeti olukorras, kus kõigil tarbijatel on EV. Kui vähendada laadijate arvu võrgus 25% või 50%, siis väheneb alajaama maksimaalne üheaegsustegur vastavalt 11,8% ja 25,0%. Aasta keskmine üheaegsustegur on võrreldes baasolukorraga mõnevõrra suurem ja vastavalt EV hulgale tõuseb 0,020 – 0,035 võrra ehk 19,4 – 34,0%. 50 maksimaalse üheaegsusteguri keskmine väärtus jääb erinevate EV osakaalude korra vahemikku 0,396-0,556 ja on baasolukorraga võrreldes vastavalt 72,9-142,8% kõrgemad. Võrreldes baasolukorraga suurenevad märgatavalt ka leitud maksimaalsed tunnipõhised üheaegsustegurid, vastavalt 0,184-0,339 ehk 65,7-121,1% võrra ehk üsna samas suurusjärgus nagu 50 maksimaalse keskmised väärtused.

Tabel 6.4 Alajaama ja fiidrite üheaegsustegurite väärtused lisades tarbimispunktidesse 3,7kW võimsusega EV laadija olukorras, kus tarbijad laevad sõidukeid samal ajal

		Baasolukord	EV 50% osakaalu korral võrgus	EV 75% osakaalu korral võrgus	EV 100% osakaalu korral võrgus
Maksimaalne tunnipõhine üheaegsustegur	AJ	0,280	0,464	0,546	0,619
	F2	0,341	0,539	0,638	0,686
	F5	0,321	0,443	0,522	0,565
Aasta keskmine tunnipõhine üheaegsustegur	AJ	0,103	0,123	0,131	0,138
	F2	0,087	0,121	0,131	0,135
	F5	0,085	0,102	0,112	0,116
50 maksimaalse tunnipõhise üheaegsusteguri keskmine väärtus	AJ	0,229	0,396	0,482	0,556
	F2	0,249	0,467	0,552	0,601
	F5	0,240	0,345	0,425	0,474

Fiidrite üheaegsustegurite arvutamisel on samuti näha, et tegurid ei suurene enam nii palju, kui seda esimese stsenaariumi korral. Maksimaalne üheaegsustegur küündib fiidril F2, kus on võrreldes fiidriga F5 vähem tarbijaid, 0,686-ni, mis on baasolukorrast 0,345

võrra suurem. Kui 11kW laadija lisamisel aasta keskmine üheaegsustegur fiidrite vaates märgatavalt ei muutunud, siis nüüd suurenesid üheaegsustegurid 0,031-0,053 võrra. Ka selle stsenaariumi puhul leidsid suuremad muutused aset väiksema tarbijate arvuga fiidril F2 ja üheaegsustegurid, tulenevalt väiksemast tarbijate arvust, küündisid seetõttu mõnevõrra kõrgemale.

Arvestades Tabel 5.2 esitatud erinevaid laadimise üheaegsustegureid, simuleeriti eelpool kirjeldatud olukordi ja saadud tulemused koondati Tabel 6.5. Tulemustest selgub, et nagu ka 11kW laadijate kasutamisel, vähenevad alajaama üheaegsustegurid märgatavalt. Alajaama maksimaalne üheaegsustegur väheneb erinevate elektriauto osakaalude korral võrgus võrreldes olukorraga, kus autosid laetakse ühel ajal 0,069-0,145 võrra ehk 14,9-23,4%. Võrreldes autode üheaegse laadimisega suurenevad aasta keskmised üheaegsustegurid alajaamas minimaalselt ning võib lugeda praktiliselt võrdseks. 50 maksimaalse üheaegsusteguri keskmised väärtused vähenevad tarbijate erinevat käitumist arvestades 19,1-27,5%.

Tabel 6.5 Alajaama ja fiidrite üheaegsustegurite väärtused lisades tarbimispunktidesse 3,7kW EV laadija arvestades erinevat laadimise üheaegsust

		Baasolukord	EV 50% osakaalu korral võrgus	EV 75% osakaalu korral võrgus	EV 100% osakaalu korral võrgus
Maksimaalne tunnipõhine üheaegsustegur	AJ	0,280	0,395	0,440	0,474
	F2	0,341	0,529	0,584	0,621
	F5	0,321	0,415	0,451	0,491
Aasta keskmine tunnipõhine üheaegsustegur	AJ	0,103	0,119	0,124	0,129
	F2	0,087	0,121	0,129	0,131
	F5	0,085	0,098	0,104	0,109
50 maksimaalse tunnipõhise üheaegsusteguri keskmine väärtus	AJ	0,229	0,320	0,367	0,403
	F2	0,249	0,447	0,500	0,527
	F5	0,240	0,312	0,347	0,387

Kui arvestada, et tarbijad ei lae autosid üheaegselt, siis fiidrite maksimaalsed üheaegsustegurid vähenesid fiidri F2 korral 0,076 ja fiidri F5 korral 0,074 võrra ehk 12,2% ja 15,1%. 50 maksimaalse üheaegsusteguri keskmised väärtused vähenesid

vastavalt 0,083 ja 0,087 ehk 15,7% ning 22,5% võrra. Samuti muutusid leitud aasta keskmised üheaegsustegurid mõnevõrra suuremaks. Seega mõjutas tarbijate erineva käitumisega arvestamine enam fiidrit, kus on rohkem tarbijaid.

6.3.5 Stsenaarium 3 tulemused

Kolmandas stsenaariumis simuleeriti olukorda, kus võrgus on nii 11kW laadijaid kui 3,7kW laadijaid. Selline stsenaarium on kõige tõenäolisem vaadates lähitulevikku, kuna lisaks täiselektrilistele autodele sõidab ringi nii praegu kui ka lähitulevikus palju plug-in hübriidelektriautosid, mida on võimalik enamjaolt laadida vaid 3,7kW laadijaid kasutades.

Simuleerimisel saadud tulemused erinevate alamstsenaariumitega on esitatud Tabel 6.6. Antud väärtused on leitud olukorras, kus ei ole arvestatud tarbijate poolse erineva käitumisega ehk kõik hakkavad elektriautosid laadima ühel ajal – kell 18.00.

Tabel 6.6 Alajaama üheaegsustegurite väärtused, kui võrgus on korraga 3,7kW ja 11kW laadijaid olukorras, kus tarbijad laevad sõidukeid samal ajal

		Baasolukord	EV laadijate 25/75 osakaal	EV laadijate 50/50 osakaal	EV laadijate 75/25 osakaal
Maksimaalne tunnipõhine üheaegsustegur	AJ	0,280	0,673	0,693	0,735
	F2	0,341	0,782	0,820	0,792
	F5	0,321	0,594	0,637	0,695
Aasta keskmine tunnipõhine üheaegsustegur	AJ	0,103	0,117	0,101	0,087
	F2	0,087	0,120	0,096	0,082
	F5	0,085	0,103	0,090	0,080
50 maksimaalse tunnipõhise üheaegsusteguri keskmine väärtus	AJ	0,229	0,613	0,653	0,683
	F2	0,249	0,685	0,752	0,744
	F5	0,240	0,524	0,587	0,633

Arvestades olukorda, kus tarbijad laevad sõidukeid üheaegselt, tõusevad maksimaalsed alajaama üheaegsustegurid erineva võimsusega laadijate osakaalul võrgus võrreldes baasolukorraga 0,393-0,455 ehk 140,4-162,5% võrra. Aasta keskmine üheaegsustegur alajaamas väheneb 11kW võimsusega laadijate suurema osakaalu korral. 50 maksimaalse tunnipõhise üheaegsusteguri keskmised väärtused suurenevad

baasolukorraga võrreldes maksimaalsete tippudega samas suurusjärgus – 0,384-0,454 võrra.

Fiidrite üheaegsustegurite uurimisel on näha, et tulemused erinevate laadimisvõimsuste kasutamisel on üsna sarnased. Mõnevõrra suuremat mõju fiidri üheaegsusteguri kujunemisel omab 11kW võimsusega laadija suurem hulk võrgus, kuid selle mõju ei ole nii märgatav. Fiidri F2 maksimaalne tunnipõhine üheaegsustegur suureneb 0,441 – 0,479 ja 50 maksimaalse tunni keskmine väärtus 0,436 – 0,503 võrra, fiidril F5 seevastu tõuseb maksimaalne üheaegsustegur 0,273 – 0,374 võrra ja 50 maksimaalse tunni keskmine väärtus 0,284 – 0,393. Nagu näha, siis suureneb nii üksik maksimaalne kui 50 tunni keskmine väärtus üsna samas suurusjärgus.

Sarnaselt eelmisele kahele stsenaariumitele uuriti ka siin, kuidas muutuvad üheaegsustegurite väärtused, kui arvestada, et tarbijad ei lae oma sõidukeid ühel ajal. Vastavad tulemused on koondatud Tabel 6.7. Tulemustest on näha, et maksimaalsed tunnipõhised üheaegsustegurid alajaamas vähenevad 24,8-30,7% ja maksimaalne üheaegsustegur 0,513 mõõdetakse olukorras, kus 3,7 ja 11kW laadijaid on võrgus võrdselt. Kuna laadimise üheaegsustegur muutub sõltuvalt sellest, milline on kasutatava laadija osakaal võrgus, siis näitab antud tulemus, et alajaama üheaegsustegurit mõjutab laadimise üheaegsus rohkem kui erineva laadimisvõimsuse kasutamine.

Alajaama aasta keskmised üheaegsustegurid sõltuvalt 3,7kW ja 11kW laadijate osakaalust võrgus esimese kahe olukorra puhul oluliselt ei muutu, kuid kolmandas olukorras suureneb 21,8%. Alajaama 50 maksimaalse üheaegsusteguri keskmine väärtus väheneb 28,7-30,9% võrreldes üheaegse laadimisega ja suurim väärtus 0,472 on olukorras, kus 75% tarbijatest omab 11kW laadijaid ja 25% 3,7kW laadijaid. Kuna loodud alamstsenaariumite korral on kasutatud erinevaid laadimiste üheaegsustegureid vastavalt Tabel 5.3, siis mõjutavad nad ka saadud alajaama üheaegsustegureid erinevalt.

Fiidrite maksimaalsed üheaegsustegurid vähenevad keskmiselt 20%. Sealjuures fiidri F5 väärtused vähenesid keskmiselt 22,4% ja fiidri F2 maksimaalsed üheaegsustegurid 17,0% ehk suurema tarbijate arvuga fiidrit mõjutab laadimise erineva üheaegsusega arvestamine enam.

Tabel 6.7 Alajaama üheaegsustegurite väärtused , kui võrgus on korraga 3,7kW ja 11kW laadijaid arvestades erinevat laadimise üheaegsust

		Baasolukord	EV laadijate 25/75 osakaal	EV laadijate 50/50 osakaal	EV laadijate 75/25 osakaal
Maksimaalne tunnipõhine üheaegsustegur	AJ	0,280	0,506	0,513	0,509
	F2	0,341	0,654	0,647	0,725
	F5	0,321	0,511	0,482	0,535
Aasta keskmine tunnipõhine üheaegsustegur	AJ	0,103	0,119	0,111	0,106
	F2	0,087	0,117	0,102	0,093
	F5	0,085	0,098	0,091	0,086
50 maksimaalse tunnipõhise üheaegsusteguri keskmine väärtus	AJ	0,229	0,437	0,458	0,472
	F2	0,249	0,548	0,582	0,647
	F5	0,240	0,409	0,442	0,467

7. VÖRDLEV ANALÜÜS JA JÄRELDUSED

Järgnevas peatükis antakse ülevaade loodud meetodist, mida käesolevas töös kasutatakse elektriautode mõju analüüsimisel võrgu üheaegsustegurile. Samuti analüüsitakse simulatsioonide tulemusi ning tehakse vastavalt nendele järeldusi elektrisõidukite mõju hindamise arvestamisel üheaegsusteguri planeerimisel.

7.1 Loodud meetodi kirjeldus

Üheaegsusteguri määramisel on oluline eristada reaalsel, mingisugustel mõõtmistulemustel leitavat üheaegsustegurit planeeritavast üheaegsusest. Planeeritava üheaegsusteguriga antakse hinnang enamasti uuele võrgule või võrgu osale, mis põhineb ekspertarvamusel ja võib erineda vastavalt elektrivõrgu operaatorile. Elektrilevi OÜ kasutab oma võrgus üheaegsustegurite määramisel enda loodud normdokumenti [35].

Elektrilevi OÜ-lt saadud alajaama tunnipõhiste elektrienergia tarbimisandmete põhjal on uuritud reaalseid üheaegsustegureid. Alajaama tunnipõhised üheaegsustegurid on saadud alajaama vaadeldava perioodi (1 aasta) tunnipõhiste tarbimisandmete jagamisel alajaama fiidrite maksimaalsete tunnipõhiste tarbimiste summaga (valem 6.1). Saadud tunnipõhiste üheaegsustegurite seast leiti maksimaalne üheaegsustegur alajaamas, aasta keskmine üheaegsustegur ja 50 maksimaalse üheaegsusteguri keskmine väärtus ehk kirjeldati ära baasolukord või -stsenaarium.

Järgnevalt hakati hindama elektriautode laadimise mõju alajaama üheaegsustegurile ehk baasolukorrale. Selleks sisestati simulatsiooniprogrammi PowerFactory Elektrilevi OÜ käest saadud fiidrite tarbimisandmed ja hakati lisama igale tarbijale EV laadimise võimekust. Tarbija EV laadimise kirjeldamiseks tuli programmis määrata järgmised parameetrid:

- Kiirlaadimise võimekus – EI/JAH
- Kiirlaadimise maksimaalne võimsus – MW
- Tavalise laadimise maksimaalne võimsus – MW
- SOC (state of charge) ehk elektriauto aku laetuse tase - %
- Aku energiamahutavus – MWh
- Varaseim aeg koju jõudmise (24h) - h

- Hiliseim aeg koju jõudmisel (24h) – h

Simuleeriti olukordi, kus madalpingevõrku on ühendatud erinev kogus 3,7kW ja 11kW võimsusega laadimispunkte, saadi uued alajaama tunnipõhised tarbimisandmed, arvutati välja vastavad uued alajaama üheaegsustegurid ja uuriti, kuidas muutuvad väärtused, kui arvestatakse, et tarbijad laevad oma sõidukeid nii üheaegselt kui ka erinevalt.

7.2 Simulatsioonide tulemuste analüüs ja järeldused

Tulemuste analüüsimisel tuleb märkida, et simuleerimisel on kasutatud parameetreid või väärtuseid, mis on suhtelised või ette määratud:

- EV laadimispunkti määramisel on simulatsioonis tarbija poolt läbitud päevane distants PowerFactory programmi poolt juhuslikult välja valitud.
- EV laadimise üheaegsuse määramisel on kasutatud ühe teadusartikli baasil saadud väärtuseid.
- EV laadimine toimub iga päev kindlaks määratud kellaajal – 18.00.
- Kasutatakse keskmiseid tunnipõhiseid tarbimisandmeid.

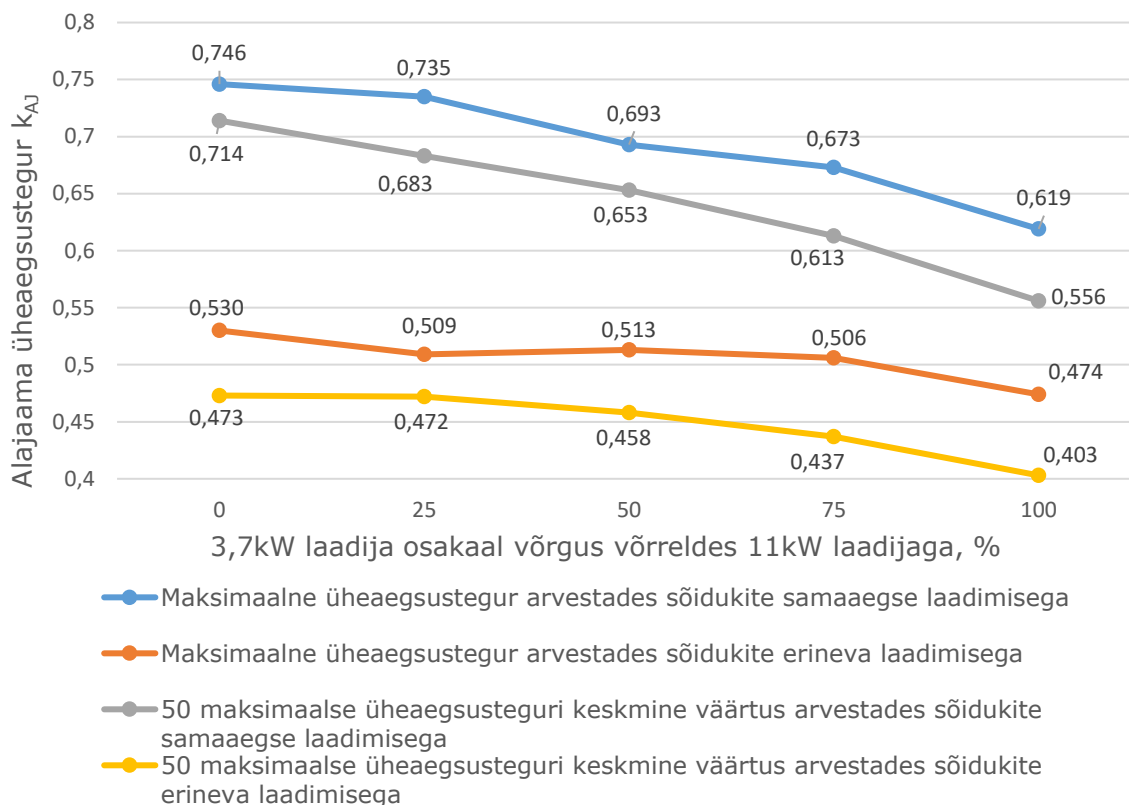
Siiski võib tõdeda, et antud tulemused on piisavad, et teha järeldusi elektriautode mõjust üheaegsusteguri määramisele.

7.2.1 3,7kW ja 11kW laadijate mõju

Tehtud simulatsioonide põhjal on võimalik võrrelda 3,7kW ja 11kW laadijate erinevat mõju üheaegsustegurile. Joonis 7.1 on kirjeldatud saadud üheaegsustegurite väärtused alajaamas, kui võrgus on erinev osakaal 3,7kW ja 11kW elektriauto laadijaid. Siinkohal on vaadatud olukorda, kus igale alajaamas olevale liitumispunktile on lisatud elektriauto. Jooniselt on näha, et mida suurem hulk laadijatest on 11kW võimsusega, seda suuremaks kujuneb alajaama üheaegsustegur.

Siiski võib täheldada teatud erinevust maksimaalse üheaegsusteguri võrdluses, kui arvestatakse elektriauto erineva laadimise üheaegsusega. Olukorras, kus võrgus on 11kW ja 3,7kW laadijaid võrdselt, on tulemus mõnevõrra suurem olukorrast, kus 75% tarbijatest on 11kW laadija ja ülejäänud 25%-l 3,7kW laadija. Selline ebakõla on tingitud tõenäoliselt seetõttu, et simuleerimise käigus on kasutatud eelpool kirjeldatud

väärtuseid, mis on muutuvad ja iga simulatsiooni käigus kujunevad tarbimismustrid veidi erinevalt ning lisaks on 3,7kW ja 11kW laadijate kasutamise üheaegsus erinev.

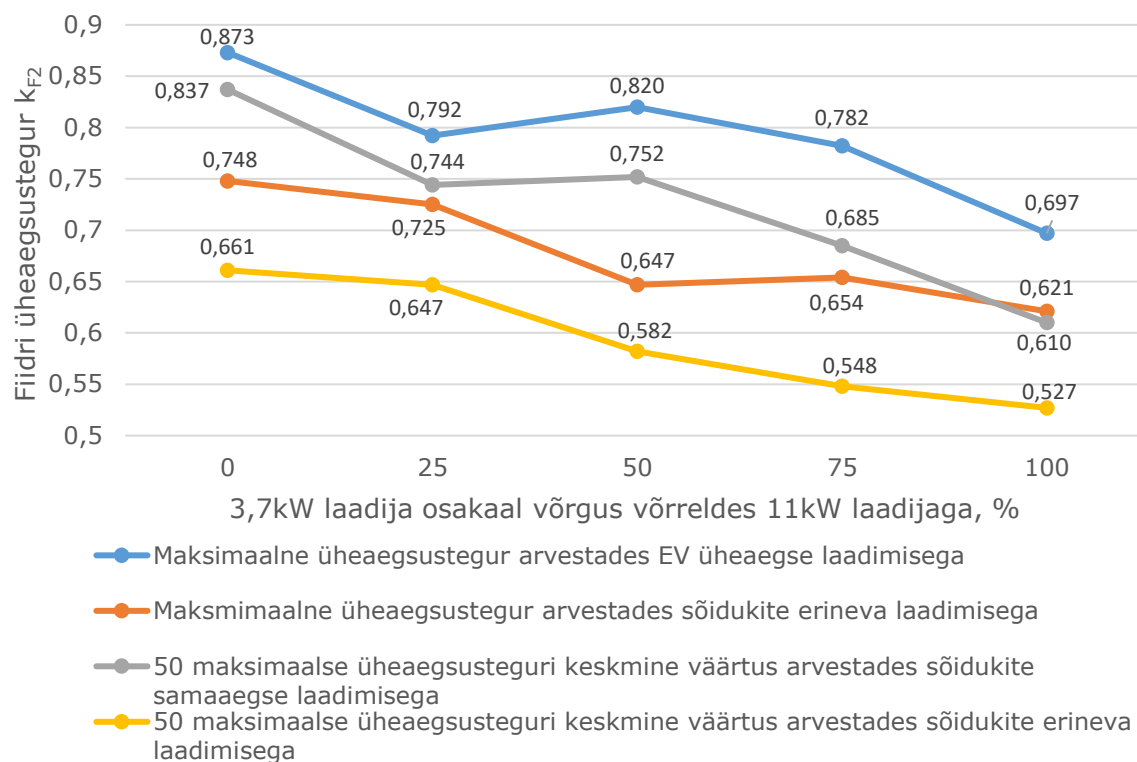


Joonis 7.1 Alajaama üheaegsus teguri muutus sõltuvalt 3,7kW ja 11kW laadijate osakaalust võrgus

3,7kW ja 11kW laadijate mõju hindamisel alajaama üheaegsus tegurile võib tõdeda, et nende laadijate mõju erinevus ei ole suur, mistõttu võib jätta laadijate erinevuse planeeritava üheaegsus teguri määramisel antud alajaama tarbijate arvu korral arvestamata.

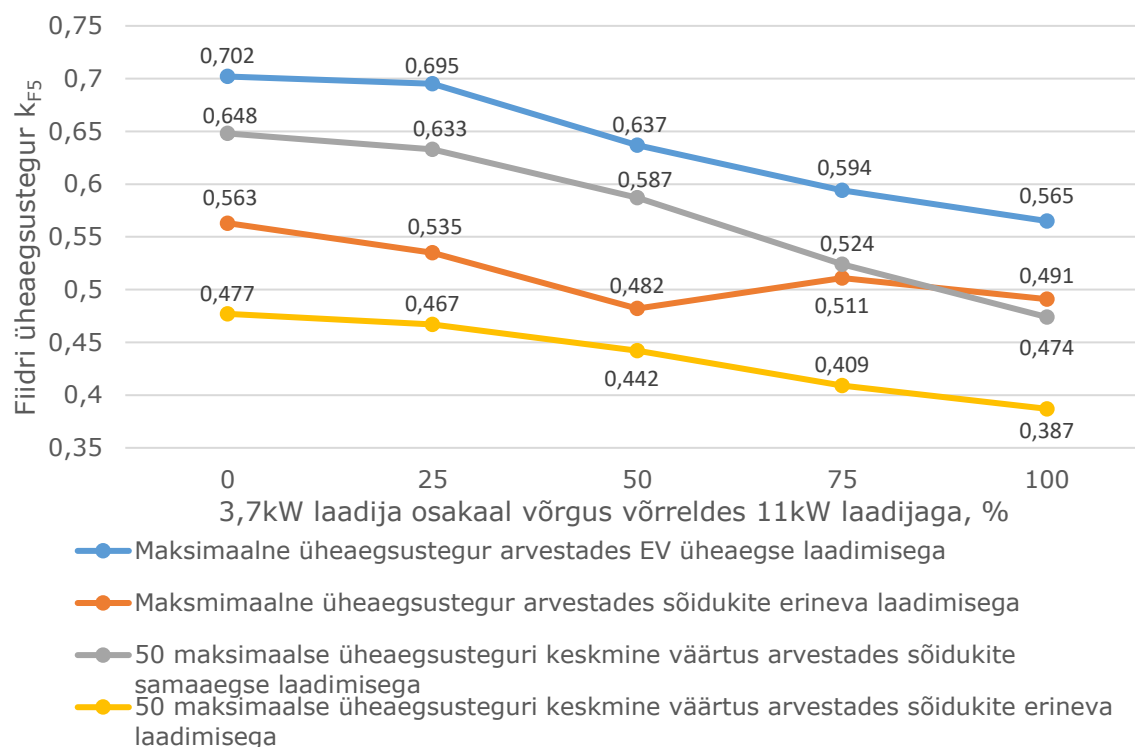
Lisaks alajaama üheaegsus tegurile on analüüsitud samadel tingimustel ka fiidreid F2 ja F5. Üheaegsus tegurite muutus sõltuvalt laadija võimsusest on esitatud Joonis 7.2 ja Joonis 7.3. Esiteks järeldeb saadud tulemustest, et fiidri F2 üheaegsus tegurid on oluliselt suuremad kui fiidril F5. Kuna fiidri F5 tarbijate arv on suurem, siis kinnitab see asjaolu, et mida rohkem tarbijaid võetakse arvesse seda madalam on üheaegsus.

Üldiselt on näha, et mida suurem osakaal 11kW laadijaid on võrgus, seda suurem on fiidri üheaegsus tegur. Siiski tuleb ka siinkohal ette olukordi, kus see nii ei ole. Kuna vaadeldavate fiidrite tarbijate arvud on madalad ja iga simuleerimine annab veidi erinevaid tulemusi sõltuvalt tarbija päevasest sõiduulatuses, siis on need väikesed ebakõlad põhjendatud.



Joonis 7.2 Fiidri F2 üheaegsusteguri muutuse sõltuvalt 3,7kW ja 11kW laadijate osakaalust võrgus

Kui jätta arvestamata 3,7kW ja 11kW laadijate erinev osakaal võrgus ja arvestada, et tarbijad laevad oma sõidukeid erinevalt, siis jääb fiidri F2 korral üheaegsustegur keskmiselt vahemikku 0,59-0,68 ja fiidril F5 vahemikku 0,44-0,52, sealjuures on tulemuste saamisel lähtunud saadud maksimaalsetest üheaegsusteguritest (maksimaalne väärtus) ja 50 maksimaalse üheaegsusteguri keskmistest väärtustest (minimaalne väärtus). Samuti on selline olukord, kus tarbijad laevad oma sõidukeid erineval ajal ja neil on kasutusel nii 3,7kW kui 11kW võimsusega laadijad kõige tõenäolisem.

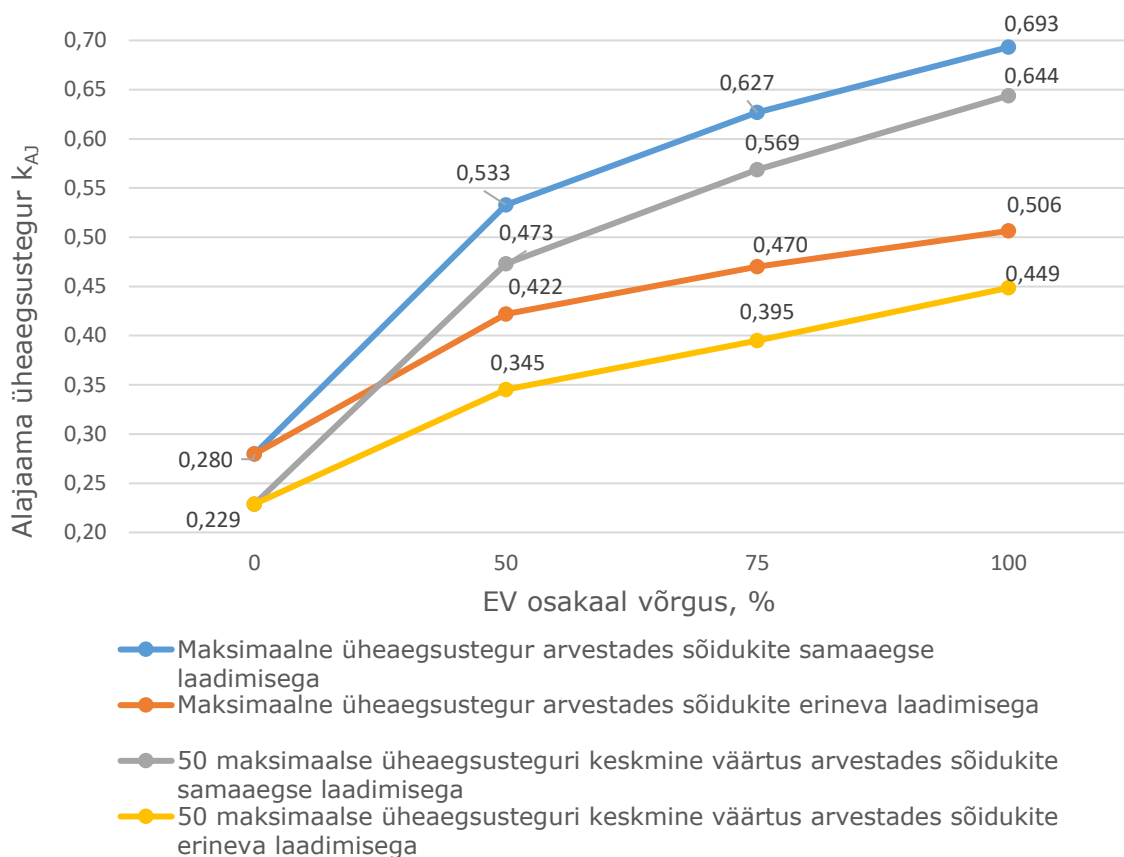


Joonis 7.3 Fiidri F5 üheaegsus teguri muutuse sõltuvalt 3,7kW ja 11kW laadijate osakaalust võrgus

Kokkuvõtvalt võib öelda, et 3,7kW ja 11kW laadijate mõju üheaegsus tegurile on sarnane ja nende eristamine planeeritava üheaegsus teguri määramisel ei ole antud andmete põhjal mõistlik. 3,7kW ja 11kW laadijate erinevat mõju võiks arvesse võtta, kui vaadata rohkemate tarbijatega võrku ja olukorda, kus on ainult üht või teist tüüpi laadijaid, kuid mida rohkem on tarbijaid, seda väiksem on tõenäosus, et kõik tarbijad omavad sama võimsusega laadijaid.

7.2.2 Elektriautode mõju erineva sõidukite koguse korral

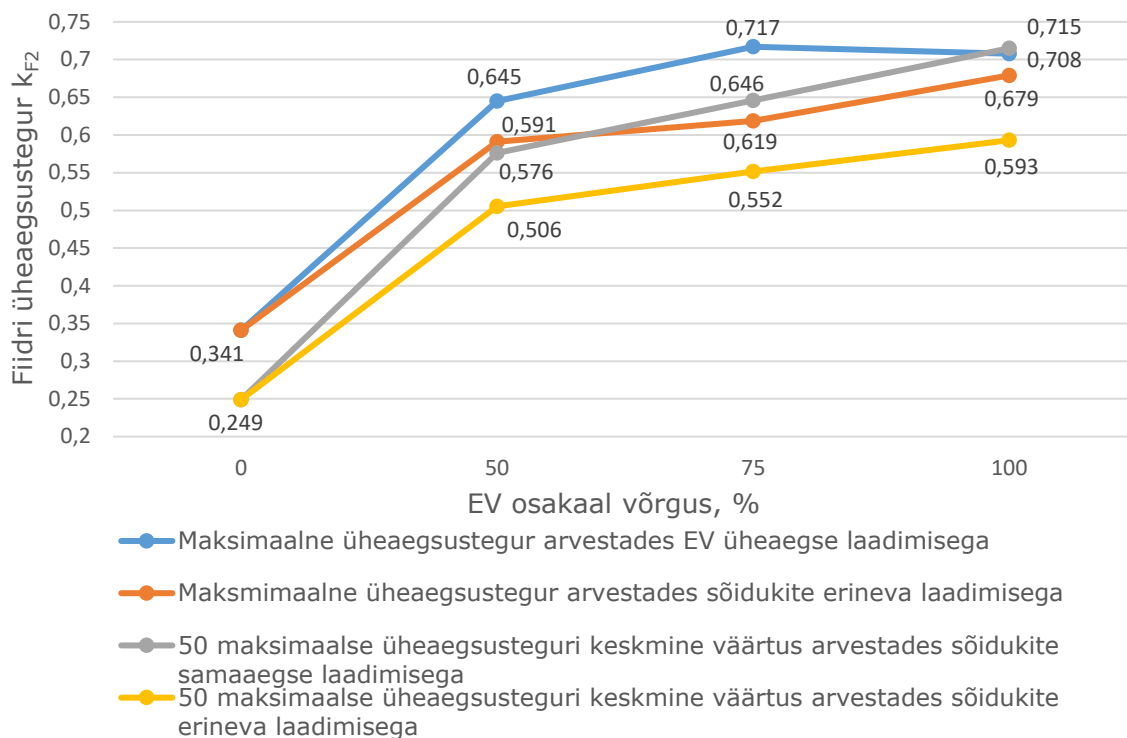
Simuleeritud olukordade põhjal saab vaadata, kuidas muutub üheaegsus tegur, kui võrku lisandub erinev kogus elektriautosid. Joonis 7.4 on kirjeldatud, kuidas muutuvad alajaamas üheaegsus tegurid, kui 50%-le, 75%-le ja 100%-le alajaamas olevatest tarbijatest lisatakse elektriauto. Tulemuste saamisel ei arvestata kasutatava laadija võimsusega ja leitakse simuleeritud stsenaariumite keskmised väärtused. Jooniselt on näha, et suurem üheaegsus teguri tõus toimub juba 50% osakaalu korral ja suuremate osakaalude juures ei ole enam tõus nii märgatav.



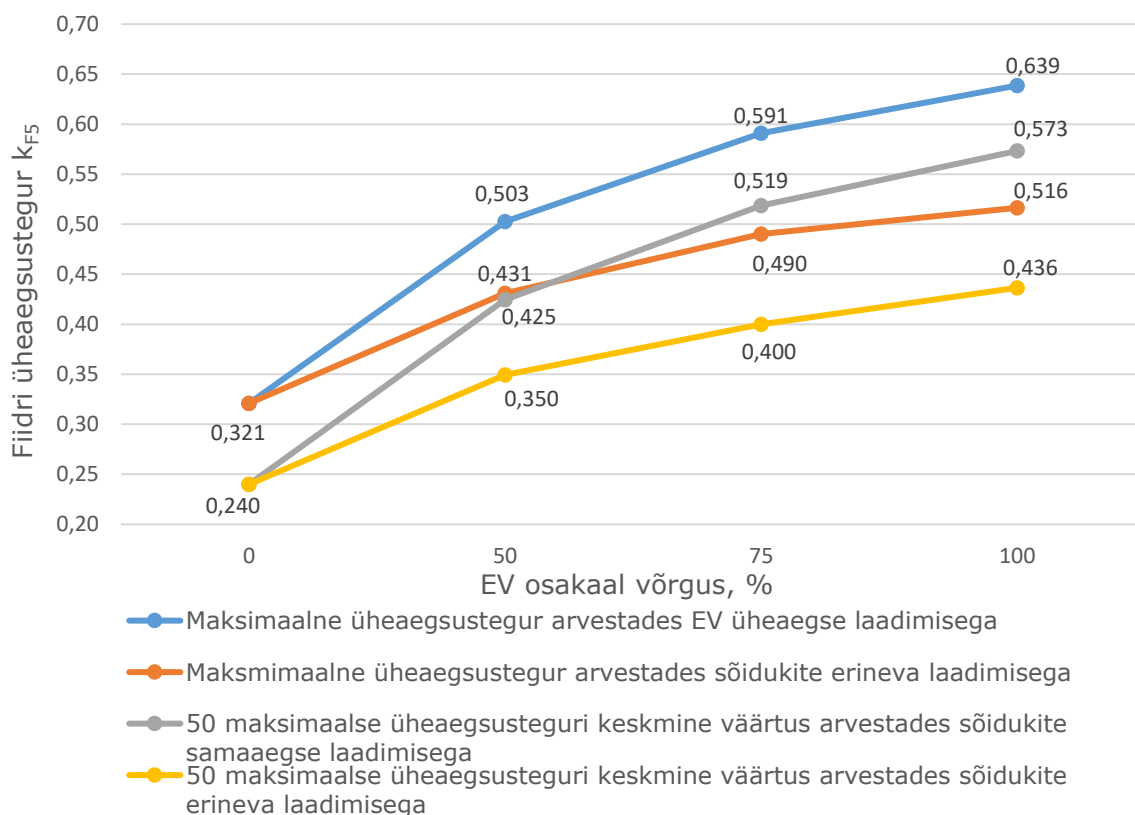
Joonis 7.4 Alajaama üheaegsusteguri muutus, kui võrku lisatakse 50%-le, 75%-le ja 100%-le tarbijatest elektrisõidukid

Võrreldes baasolukorraga tõuseb üheaegsustegur alajaamas sõidukite samaaegsel laadimisel olenevalt EV osakaalust keskmiselt 0,25-0,41 võrra. Seevastu, kui arvestada, et sõidukeid laetakse erinevatel aegadel, siis tõuseb üheaegsustegur alajaamas 0,13 – 0,22 võrra.

Fiidrite üheaegsustegurite analüüsimisel (Joonis 7.5, Joonis 7.6) võib näha sarnast mõju nagu alajaama korral. Kui fiidri F5 üheaegsustegurite väärtused suurenevad tarbijate samasuguse käitumise korral 0,18-0,33 võrra, siis arvestades sõidukite erineva laadimisajaga tõusevad tegurid 0,11 – 0,20 võrra. Samas fiidril F2, kus on mõnevõrra vähem tarbijaid, omab EV lisandumine võrreldes fiidriga F5 suuremat mõju. Üheaegsustegurid fiidril F2 suurenevad sõltuvalt EV hulgast arvestades tarbijate samaaegse laadimisega 0,30 – 0,47 võrra ning arvestades erineva laadimisajaga 0,25 – 0,37 võrra.



Joonis 7.5 Fiidri F2 üheaegsus teguri muutus, kui võrku lisatakse 50%-le, 75%-le ja 100%-le tarbijatest elektrisõidukid



Joonis 7.6 Fiidri F5 üheaegsus teguri muutus, kui võrku lisatakse 50%-le, 75%-le ja 100%-le tarbijatest elektrisõidukid

Kokkuvõtvalt saab öelda, et kui võrgus on juba 50%-l tarbijatest elektriauto, siis omab see märgatavat mõju alajaama või fiidri üheaegsustegurile vaadeldavas piirkonnas. Suurenev elektrisõidukite arv enam sedavõrd suurt üheaegsusteguri suurenemist ei too, ent on märgatav, kui arvestada, et EV arv kahekordistub. Seega tuleks üheaegsusteguri määramisel arvestada, kas EV võimekus on vaid pooltel või kõigil tarbijatel.

7.3 Soovitused uue madalpingevõrgu planeerimisel

Vastavalt analüüsitud piirkonna andmetele saab anda soovitusi uute üheaegsustegurite planeerimisel. Elektrilevi normdokumendis [35] on määratud üheaegsustegurid, mida planeerimisel arvesse võtta. Vastavalt antud dokumendis toodud tabelile on koostatud uus -Tabel 7.1, kuhu on lisatud, milliseid üheaegsustegureid kasutada, kui arvestada, et pooltel või kõigil liitumispunktidel on elektriauto. Uute väärtuste loomisel on kasutatud järgmiseid tingimusi:

- Arvestatakse tulemusi, kus tarbijad laevad oma sõidukuid erinevatel aegadel. Kuna inimeste käitumine on üldiselt erinev, siis tuleks üheaegsusteguri planeerimisel sellega arvestada. Käitumine võib muutuda, kui arvestatakse mõnda ühist indikaatorit, näiteks elektri hind ja hakatakse oma sõidukeid vastavalt hinnale laadima. Siiski on üldiselt tarbimise tiputundidel elektri hind kõrgem, seega ei tohiks elektriautode hinnapõhine laadimine tarbimistippe sedavõrd mõjutada. Saadud tulemused on ümardatud ülesse, kuna kohati võivad simuleerimisel kasutatud laadimiste üheaegsustegurid olla alahinnatud.
- Ei võeta arvesse 3,7kW ja 11kW laadijate mõneti erinevat mõju, kuna vastavalt töös saadud tulemustele, ei tasu neid eristada üheaegsusteguri planeerimisel.
- Tuuakse välja planeeritavad üheaegsustegurid, kui võrgus on pooltel tarbijatest või igal tarbijal elektriauto. Toetudes peatükis 3 välja toodud arengukavadele, siis tuleb pikas perspektiivis arvestada suure elektrisõidukite osakaaluga.
- Kasutatakse leitud maksimaalseid üheaegsustegureid vaadeldud perioodil, kuna hinnangute andmisel tuleks arvestada suurimate võimalike väärtustega, mis tehtud simulatsioonide tulemustel välja kujunesid.

Tabel 7.1 Planeeritavad üheaegsustegurid arvestades elektrisõidukite lisandumisega

LP-de arv	KP/MP AJ kesktihe varustuskindluse piirkond			
	Üheaegsustegur vastavalt ELV dokumendile	Üheaegsustegur reaalsete tarbimisandmete põhjal	Üheaegustegur arvestades 50%-le LP-st elektriauto	Üheaegustegur arvestades 100%-le LP-st elektriauto
1	1	1	1	1
9 - 11	0,4	0,35	0,65	0,7
12 - 14	0,4	0,35	0,45	0,6
15 - 60	0,4	0,3	0,45	0,55

Tabelis on välja toodud vaid need liitumispunktide arvud ja nendele vastavad üheaegsustegurid, mida käesoleva töö raames uuriti. Kuna antud töö on üles ehitatud ühe alajaama andmete põhjal, siis tõesemate tulemuste saamiseks tuleks vaadata veel lisaks analoogseid piirkondi. Tulemustest on näha, et antud piirkonnas tuleks sõltuvalt liitumispunktide ja elektrisõidukite arvust määrata üheaegsustegur vahemikku 0,45 – 0,7. ELV normdokumendis määratud väärtustega võrreldes leiavad suuremad muutused aset väiksema liitumispunktide arvu korral, kui näiteks 9 liituja puhul tuleks kõigile elektriauto lisamisel arvestada 0,35 võrra suurema üheaegsusega. Samas nähtub ELV dokumendist, et rohkemate liitumispunktide korral arvestatakse sama üheaegsusega, mis aga vastavalt reaalsete tarbimisandmete põhjal arvatatud üheaegsusteguritest peaks mõnevõrra vähenema. Võttes aluseks reaalsel andmetel arvatud üheaegsusteguri, tuleks antud piirkonnas planeerimisel arvestada sõltuvalt lisanduvate elektriautode hulgale keskmiselt 0,1 – 0,4 võrra suurema üheaegsusteguriga. Antud uuring näitab, kuidas suurenev EV hulk avaldab olulist mõju planeeritava üheaegsusteguri määramisele.

KOKKUVÕTE

Käesoleva töö käigus uuriti, kuidas mõjutab elektriautode lisandumine linnalähedase uuselamupiirkonna madalpingevõrgus üheaegsusteguri määramist. Selleks analüüsiti jaotusvõrguettevõtte Elektrilevi OÜ käest saadud alajaama liitumispunktide tarbimisandmeid, mille põhjal arvutati välja reaalsed tarbimisandmetel põhinevad alajaama ja fiidrite üheaegsustegurid. Tuginedes reaalselele tarbimisandmetele on maksimaalne üheaegsustegur vaadeldavas alajaamas 0,28, fiidril F2 0,34 ja fiidril F5 0,32. Vastavalt leitud tulemustele simuleeriti Digsilent PowerFactory tarkvaras kolme loodud stsenaariumi alusel liitumispunktide uued koormusgraafikud lisades tarbimispunktidesse elektrisõidukeid ning arvutati välja vastavad uued üheaegsustegurid alajaamas ja fiidritel. Madalpingevõrgu üheaegsusteguri näol mõistetakse antud töös vaadeldava perioodi jooksul esinenud alajaama või fiidri üheaegse maksimaalse tarbimise suhet samal ajaperioodil esinenud vastavate liitumispunktide maksimaalsete tarbimiste summasse.

Töö esimeses stsenaariumis uuriti olukorda, kuidas alajaama ja fiidrite tarbimiskõverad muutuvad, kui elektriautode laadimispunkte on võrgus 50%-l, 75%-l ja 100%-l vaadeldava võrgu liitumispunktide arvust ja tarbijad kasutavad sõidukite laadimisel ainult 11kW võimsusega laadijaid. Teises stsenaariumis vahetati võrreldes esimese stsenaariumiga vaid laadija võimsust ja 11kW laadija asemel kasutati 3,7kW võimsusega laadijaid. Viimases kolmandas stsenaariumis lisati igale tarbimispunktile EV ja simuleeriti olukordi, kus võrgus on nii 3,7kW kui 11kW võimsusega laadijaid erinevates osakaaludes. Kõiki stsenaariumeid simuleeriti arvestades, et tarbijad laevad sõidukeid samaaegselt ja vastavalt teaduskirjanduses välja toodud laadimise üheaegsustegureid kasutades.

Tulemustest selgus, et 3,7kW laadijate kasutamisel suurenevad alajaama ja fiidrite üheaegsustegurid mõnevõrra vähem, kui kasutades 11kW laadijaid. Mõju erinevus ei ole aga piisavalt suur, et hakata üheaegsusteguri planeerimisel eristama nende laadijate erinevat mõju. Lisaks peaks arvestama, et mida suurem on liitumispunktide arv, seda väiksemaks jääb tõenäosus, et kõik tarbijad kasutavad ainult 3,7kW või 11kW laadijat, kus see mõju vastavalt kõige rohkem eristub.

Erineva koguse elektrisõidukite lisandumine elektrivõrku omab olulist mõju alajaama ja fiidrite üheaegsustegurite kujunemisel. Seetõttu tuleks üheaegsusteguri planeerimisel eristada vastavalt simuleeritud stsenaariumitele olukordi, kus pooltele liitumispunktile on lisatud EV laadimise võimekus olukorrast, kus see on kõigil liitujatel. Vastavalt sellele tuleks vaadeldavas alajaamas, kus on kokku 46 liitumispunkti

määrata üheaegsusteguriks 0,45, kui arvestada, et vähemalt pooltel liitujatel on EV ja 0,55, kui need on kõigil. Üheaegsusteguri väärtus suureneb väiksema liitumispunktide arvu korral. Seega tuleks antud alajaamas fiidril F2, kus on 9 liitumispunkti, üheaegsustegur määrata vastavalt lisanduvatele sõidukite arvule vahemikus 0,65 – 0,7. Seevastu fiidril F5, kus on 14 liitumispunkti tuleks üheaegsustegur määrata vahemikus 0,45 – 0,6. Sealjuures on soovitude andmisel lähtunud tulemustest, mis arvestavad teaduskirjanduses välja toodud elektriautode laadimise üheaegsustegureid ning need vastavalt ülespoole ümardatud.

Käesoleva töö raames on määratud mitmeid parameetreid ja tehtud eelduseid ja üldistusi, mis saadud tulemusi mõjutavad:

- EV laadimispunkti määramisel on simulatsioonis tarbija poolt läbitud päevane distant PowerFactory programmi poolt juhuslikult välja valitud. See omakorda mõjutab laadimisaja pikkust, mis omakorda võib mõjutada maksimaalsete tarbimistippude väärtuseid. Lisaks võivad need läbitavad distantsid iga uue olukorra simuleerimisel veidi erineda.
- EV laadimise üheaegsuse määramisel on kasutatud ühe teadusartikli baasil saadud väärtuseid. Täpsemate tulemuste saamiseks võiks vaadelda mitmeid uuringuid ja võrrelda nende tulemusi omavahel.
- EV laadimine toimub iga päev kindlaks määratud kellaajal – 18.00. Võrdluseks võiks vaadata, kuidas muutuvad vaadeldud perioodil registreeritud tarbimise tippväärtused, mis alajaama puhul registreeriti kell 19.00 ja fiidril F2 kell 11.00.
- Kasutatud on keskmiseid tunnipõhiseid tarbimisandmeid. Täpsemate tulemuste saamiseks võiks kasutada lühemat perioodi, näiteks 1 või 15 minuti andmeid.
- Kasutatakse ühe alajaama kindla aasta andmeid. Sõltuvalt asjaolust, et kliima on iga aasta erinev, siis tulenevalt ilmastikutingimustest on ka elektrienergia tarbimine sellest sõltuv. Seetõttu võiks vaadata mõnda varasemat perioodi lisaks.

Kokkuvõtvalt võib öelda, et antud töö annab hea ettekujutuse, kuidas elektrisõidukite suuremahuline lisandumine hakkab loodud meetoodika alusel mõjutama madalpingevõrgus üheaegsusteguri määramist. Kindlasti tuleks paremate ja täpsemate hinnangute andmiseks uurida lisaks mõne teise analoogse liitumispunktide arvuga alajaama andmeid ja vaadata lisaks erinevate liitumispunktide arvuga alajaamasid.

SUMMARY

In this study, the impact of adding electric vehicles (EVs) to a low-voltage network in a suburban new residential area on the determination of the coincidence factor was studied. For this purpose, consumption data from the connection points of substation provided by the distribution network operator Elektrilevi OÜ were analyzed, based on which the actual substation and feeder coincidence factors were calculated. Based on real consumption data, the maximum coincidence factor in the observed substation is 0,28, on feeder F2 it is 0,34 and on feeder F5 it is 0,32. Based on the results, three scenarios, where EVs were added to the consumption points were simulated using the DigSilent PowerFactory software. The corresponding new coincidence factors for substation and feeders were then calculated. In this context, the coincidence factor of the low-voltage network refers to the ratio of simultaneous maximum consumption during the observed period at the substation or feeder to the sum of the maximum consumption of the corresponding connection points during the same period.

In the first scenario, the changes in the consumption curves of substation and feeders were studied, when the number of EV charging points in the network is 50%, 75% and 100% of the observed network connection points and consumers use only 11kW chargers for vehicle charging. In the second scenario, only the charger power was changed and 3,7kW chargers were used instead of 11kW chargers. In the third scenario, an EV was added to each consumption point, and the simulations were carried out when there were both 3,7kW and 11kW chargers with different proportions in the network. All scenarios were simulated assuming that consumers charge their vehicles simultaneously or using the charging coincidence factors outlined in the literature.

The results showed that when using 3,7kW chargers, the coincidence factors of substation and feeders increase slightly less than when using 11kW chargers. However, the difference in impact was not significant enough to start distinguishing the different effects of the chargers in planning the coincidence factor. It should be noted that the greater number of connection points are considered, the lower probability that all consumers use only 3,7kW and 11kW chargers is, where this effect is most pronounced.

Adding a different number of EVs to the electricity network has a significant impact on the substation and feeders coincidence factors. Therefore, when planning the coincidence factor, there should be distinguished situations, where the capability of EV charging is added to half of the connection points compared to all connection points. Accordingly, in the observed substation with a total of 46 connection points, the coincidence factor should be determined as 0,45 if at least half of the connection points

have EVs and 0,55 if they are present in all points. The coincidence factor increases with a smaller number of consumers. For feeder F2, with 9 consumers, the coincidence factor should be determined according to the number of additional vehicles in the range of 0,65 – 0,7. For feeder F5, with 14 consumers, the coincidence factor should be determined in the range of 0,45 – 0,6. The recommendations were based on results that took into account the vehicles charging coincidence factors outlined in literature and round them upwards accordingly.

During the study, several parameters were determined, assumptions and generalizations were made that affect the results:

- When determining the EV charging point in the simulation software, the daily distance traveled by the consumer is randomly selected by the PowerFactory. This affects the length of the charging time, which may affect the values of the maximum consumption peaks. In addition, these distances may vary slightly with each new situation simulated.
- The charging simultaneity was based on values from a single scientific article. For more accurate results, multiple studies should be considered, and their results compared.
- EV charging takes place at a fixed time each day – 18:00. For comparison we could examine how the recorded peak consumption values in the observed period change, for substation it was recorded at 19:00 and for feeder F2 at 11:00.
- Hourly average consumption data is used. For more accurate results, shorter periods, such as 1 or 15-minute data, could be used.
- Data from a single substation for a specific year is used. Depending on the fact that the climate is different every year, electricity consumption also depends on the weather conditions. Therefore, it would be advisable to look at data from previous periods as well.

In summary, it can still be said that this study provides a good insight into how a large number of EVs will affect the determination of the coincidence factor in a low-voltage network. To provide better and more accurate estimates, it would be advisable to also examine the data from substations with a similar number of connection points and additionally look at substations with different numbers of connection points.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] „IEC60050-691:1973 International Electrotechnical Vocabulary. Tariffs for electricity. – Tallinn, Eesti Standardikeskus.“ Vaadatud: 22. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/index?openform&part=691>
- [2] K. Vill, „Tarbimise juhtimise mõju elektri kvaliteedile kortermajas“, TTÜ Elektrotehnika insituut, Tallinn, 2015.
- [3] C. R. Bayliss ja B. J. Hardy, „Distribution Planning“, *Transmission and Distribution Electrical Engineering*, lk 939–985, jaan 2012, doi: 10.1016/B978-0-08-096912-1.00023-X.
- [4] C. Bary, „Coincidence-Factor Relationships of Electric-Service-Load Characteristics“, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, kd 64, nr 9, lk 623–629, 1945, doi: 10.1109/T-AIEE.1945.5059190.
- [5] G. Gust, A. Schlüter, S. Feuerriegel, I. Úbeda, J. T. Lee, ja D. Neumann, „Designing electricity distribution networks: The impact of demand coincidence“, *Eur J Oper Res*, kd 315, nr 1, lk 271–288, mai 2024, doi: 10.1016/J.EJOR.2023.11.029.
- [6] J. Dickert ja P. Schegner, „Residential load models for network planning purposes“, *2010 Modern Electric Power Systems*, 2010, lk 1–6.
- [7] L. Wallhager, „Coincidence Factor and Battery Energy Storage Systems for Industrial Electrical Power Supply: A Field Study of Building 178 at Scania AB, Södertälje“, Stockholm, 2023.
- [8] R. Gupta *et al.*, „Spatial analysis of distribution grid capacity and costs to enable massive deployment of PV, electric mobility and electric heating“, *Appl Energy*, kd 287, lk 116504, apr 2021, doi: 10.1016/J.APENERGY.2021.116504.
- [9] B. Thormann ja T. Kienberger, „Estimation of Grid Reinforcement Costs Triggered by Future Grid Customers: Influence of the Quantification Method (Scaling vs. Large-Scale Simulation) and Coincidence Factors (Single vs. Multiple Application)“, *Energies (Basel)*, kd 15, nr 4, veebr 2022, doi: 10.3390/en15041383.
- [10] S. Bielecki, „Estimation of maximum loads of residential electricity users“, *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, dets 2019. doi: 10.1051/e3sconf/201913701006.
- [11] J. Maasmann ja S. Kippelt, „Using Flexibilities of E-Mobility in planning and operation of electrical grid with grid-supporting charging infrastructure“, *EPJ Web Conf*, kd 217, lk 01009, 2019, doi: 10.1051/epjconf/201921701009.

- [12] „Pakett 'Eesmärk 55'". Vaadatud: 18. november 2023. [Online]. Available at: <https://www.consilium.europa.eu/et/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>
- [13] „Euroopa parlamendi ja nõukogu määrus (EL) 2019/631", 2019.
- [14] „Euroopa parlamendi ja nõukogu määrus PE-CONS 25/23 - alternatiivkütuste taristu kasutuselevõtt", Brüssel, 2023.
- [15] „Eesti elektrivarustuskindluse aruanne", Tallinn, 2022.
- [16] E. Kraav *et al.*, „Study to determine Estonian electricity demand scenarios", 2022.
- [17] „Energiamajanduse arengukava aastani 2030", Tallinn, 2017. [Online]. Available at: <http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=Kategooria:M%C3%B5isted>
- [18] „Eesti riiklik energia- ja kliimakava aastani 2030".
- [19] B. Thormann ja T. Kienberger, „Evaluation of grid capacities for integrating future E-Mobility and heat pumps into low-voltage grids", *Energies (Basel)*, kd 13, nr 19, okt 2020, doi: 10.3390/en13195083.
- [20] M. Chesser, P. Lyons, P. O'Reilly, ja P. Carroll, „Probability density distributions for household air source heat pump electricity demand.", *Procedia Comput Sci*, kd 175, lk 468–475, jaan 2020, doi: 10.1016/J.PROCS.2020.07.067.
- [21] M. Akmal, B. Fox, J. D. Morrow, ja T. Littler, „Impact of heat pump load on distribution networks", *IET Generation, Transmission and Distribution*, kd 8, nr 12, lk 2065–2073, dets 2014, doi: 10.1049/iet-gtd.2014.0056.
- [22] C. Protopapadaki ja D. Saelens, „Heat pump and PV impact on residential low-voltage distribution grids as a function of building and district properties", *Appl Energy*, kd 192, lk 268–281, apr 2017, doi: 10.1016/J.APENERGY.2016.11.103.
- [23] N. ; Shao, S. ; You, ja H. Segerberg, „Integration of 100% heat pumps and electric vehicles in the low voltage distribution network: A Danish Case Study", APA, 2013.
- [24] T. Weckesser, D. F. Dominković, E. M. V. Blomgren, A. Schledorn, ja H. Madsen, „Renewable Energy Communities: Optimal sizing and distribution grid impact of photo-voltaics and battery storage", *Appl Energy*, kd 301, lk 117408, nov 2021, doi: 10.1016/J.APENERGY.2021.117408.
- [25] P. Denholm ja R. M. Margolis, „Evaluating the limits of solar photovoltaics (PV) in electric power systems utilizing energy storage and other enabling technologies", *Energy Policy*, kd 35, nr 9, lk 4424–4433, sept 2007, doi: 10.1016/J.ENPOL.2007.03.004.
- [26] M. Hemmingsson ja M. Lexholm, „Dimensioning of smart power grids for the future Within ELFORSK Program Smart Grids Elforsk rapport 13:98", 2013.

- [27] I. Jokinen ja M. Lehtonen, „Modeling of Electric Vehicle Charging Demand and Coincidence of Large-Scale Charging Loads in Different Charging Locations; Modeling of Electric Vehicle Charging Demand and Coincidence of Large-Scale Charging Loads in Different Charging Locations“, *IEEE Access*, kd PP, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2022.Doi.
- [28] M. R. Khalid, M. S. Alam, A. Sarwar, ja M. S. Jamil Asghar, „A Comprehensive review on electric vehicles charging infrastructures and their impacts on power-quality of the utility grid“, *eTransportation*, kd 1, lk 100006, aug 2019, doi: 10.1016/J.ETRAN.2019.100006.
- [29] R. Jarvis ja P. Moses, „Smart Grid Congestion Caused by Plug-in Electric Vehicle Charging“, *2019 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, 2019, lk 1–5. doi: 10.1109/TPEC.2019.8662152.
- [30] J. Bollerslev *et al.*, „Coincidence Factors for Domestic EV Charging from Driving and Plug-In Behavior“, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, kd 8, nr 1, lk 808–819, märts 2022, doi: 10.1109/TTE.2021.3088275.
- [31] Z. Liu, Q. Wu, A. H. Nielsen, ja Y. Wang, „Day-Ahead Energy Planning with 100% Electric Vehicle Penetration in the Nordic Region by 2050“, kd 7, lk 1733–1749, 2050, doi: 10.3390/en7031733.
- [32] F. Silber, S. Scheubner, ja A. März, „Analysis of the simultaneity factor of fast-charging sites using Monte-Carlo simulation“, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, kd 155, lk 109540, jaan 2024, doi: 10.1016/J.IJEPES.2023.109540.
- [33] P. Andreas Gunkel, H. Klinge Jacobsen, C. M. Bergaentzlé, F. Scheller, ja F. Møller Andersen, „Variability in electricity consumption by category of consumer: The impact on electricity load profiles“, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, kd 147, lk 108852, mai 2023, doi: 10.1016/J.IJEPES.2022.108852.
- [34] DIgSILENT PowerFactory, „PowerFactory 2024“. DIgSILENT GmbH, Gomaringen, 2024. [Online]. Available at: <https://www.digsilent.de>
- [35] *Planeerimise põhimõtted, ver. 4*. Eesti: Elektrilevi OÜ.

Lisa 1 Võrgu elektriskeem koos elektriautodega DigSilent PowerFactory tarkvaras

