



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

# ISEJUHTIVA BUSSI ISEAUTO LAADIMISE MÕJU TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOLI ELEKTRISÜSTEEMILE

IMPACT OF ISEAUTO CHARGING SYSTEM ON TALTECH ELECTRICAL SYSTEM

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Aleksandr Alba

Üliõpilaskood: 154050AAVB

Juhendaja: Anton Rassõlkin, teadur

Konsultant: Victor Astapov, teadur

Tallinn, 2019

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

“.....” ..... 201.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 201.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

# LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Aleksandr Alba

*Lõputöö liik:* Bakalaureusetöö

*Töö pealkiri:* Isejuhtiva bussi ISEAUTO laadimise mõju Tallinna Tehnikaülikooli elektrisüsteemile

*Kuupäev:* 13.05.2019

*56 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)*

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja(d):* Anton Rassõlkin

*Töö konsultant (konsultandid):* Victor Astapov

*Sisu kirjeldus:*

Töö põhieesmärgiks on uurida kuidas võib mõjutada isejuhtiva bussi ISEAUTO laadimine TalTech elektrisüsteemile. Samuti anda lühike ülevaade elektriautode laadimisest ja parameetritest ning töös on kirjeldatud mõjud, mis mittelineaarsed seadmed nagu elektriauto laadija toovad elektrisüsteemile. Millised nendest mõjudest on kõige olulisemad ja kuidas nad kahjustavad elektrienergia kvaliteedi.

Põhi uurimis objektiks on isejuhtivbuss ISEAUTO. Autor räägib projekti ajaloost, praegusest seisust ja tulevikust ning uurib potentsiaalsed mõjud TalTech-i elektrisüsteemile kasutades DigSILENT arvutiprogrammi. Selle programmiga on simuleeritud erinevad olukorrad TalTech-i alajaamades, nende hulgas on selle uuringu raames ka koormuse ja harmoonikate mõjud alajaamadele. Autor räägib täpsemalt Energeetikamaja alajaamast, selle parameetrites ja näitab mis juhtub kui alajaamaga ühendada 50 ISEAUTO-d ning millal neid kõige mõislikum laadima panna.

*Märksõnad:* ISEAUTO, elektriauto, isejuhtivbuss, mõjud, elektrisüsteem, harmoonikad, elektrivõrk, laadimine, pingemoonutused, voolumoonutused, asümmeetria, pingelang, koormus, akud, sõiduk

## ABSTRACT

<i>Author:</i> Aleksandr Alba	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Title:</i> Impact of ISEAUTO charging system on TalTech electrical system	
<i>Date:</i> 13.05.2019	<i>56 pages (the number of thesis pages including appendices)</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Anton Rassõlkin	
<i>Consultant(s):</i> Victor Astapov	
<i>Abstract:</i> <p>The main goal of the work is to examine how the loading of the self-driving ISEAUTO bus to the TalTech electrical system can be affected. Also, give a brief overview of the charging and parameters of electric cars and the effects of non-linear devices such as an electric car charger on the electrical system are described. Which of these impacts are most important and how they affect the quality of electricity.</p> <p>The main subject of the research is the self-guided bus ISEAUTO. The author talks about the history of the project, its current state and future, and examines the potential impacts on TalTech's electrical system using the DlgSILENT computer program. This program has simulated different situations at TalTech substations, including the effects of load and harmonics on the substation. The author speaks more specifically about the substation of the Energy House, its parameters and shows what happens when 50 ISEAUTOs are connected to the substation and when to put them in the most reasonable way.</p>	
<i>Keywords:</i> ISEAUTO, electric car, self-driving bus, effects, electrical system, harmonics, electrical network, charging, voltage distortion, current distortion, asymmetry, voltage drop, vehicles, loads	

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	<b>Isejuhtiva bussi ISEAUTO laadimise mõju Tallinna Tehnikaülikooli elektrisüsteemile</b>
Lõputöö teema inglise keeles:	
Üliõpilane:	<b>Aleksandr Alba 154050AAVB</b>
Eriala:	<b>elektroenergeetika</b>
Lõputöö liik:	<b>bakalaureusetöö</b>
Lõputöö juhendaja:	<b>Anton Rassõlkin</b>
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	<b>Kevad 2019</b>
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>25.05.2019</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Viimasel ajal on maailmas ja ka Eestis on hakanud levima elektriautod, seega on tekkinud ka erinevad võimalused nende akude laadimiseks. Antud töös on toodud erinevate laadijate tööpõhimõtted, parameetrid ja nende mõju elektrisüsteemi talitlusele. Vaadeldakse ka ISEAUTO-laadijate mõju TalTech elektrisüsteemile ning kõige mõistlikumad kohad laadimispunktide paigaldamiseks TalTech linnaku territooriumil.

## 2. Töö eesmärk

Tänapäevane elektriautode laadijate ülevaade ja nende mõju elektrisüsteemidele. ISEAUTO-laadijate mõju TalTech elektrisüsteemile.

## 3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Uurida millised elektriautode laadijad on maailmas olemas, nende töö põhimõtted ja elektrilised parameetrid.
- Vaadelda kuidas mõjuvad elektriautode laadijad elektrisüsteemile, uurida millised elektrisüsteemi parameetrid on kõige tundlikumad ning ka nende potentsiaali.
- Teha ülevaade kuidas elektriautode laadijad elektrisüsteemiga ühendatakse, millised on tüüpilised lahendused maailmas. (V2G, väikesed kodu võrgud, G2V)

- Uurida ja simuleerida arvutiprogrammis DlgSilent PowerFactory kuidas võib mõjutada ISEAUTO laadimine TalTech elektrisüsteemile ning arvutada kus kohas on kõige mõistlikum paigaldada laadimispunktid.

#### **4. Lähteandmed**

- Elektriautod maailmas – AURORA energy research
- ISEAUTO projekti andmed
- Taltech elektrisüsteemi andmed

#### **5. Uurimismeetodid**

- Arvuti programmidega simuleerimine (MATLAB, DlgSILEMT jne)
- Kirjanduse ja artiklite analüüs
- Valemite ja graafikute kasutamine
- TalTech elektrisüsteemi uurimine ja analüüs

#### **6. Graafiline osa**

TalTech elektriskeem

ISEAUTO laadimispunktide paigaldamise skeem

#### **7. Töö struktuur**

##### **1.ELEKTRIAUTODE JA NENDE LAADIJATE ÜLEVAADE**

###### **1.1 Elektriautode tüübid**

###### **1.1.1 Akutoidega elektriauto (BEV)**

###### **1.1.2 Laetavad hübriidelektrisõidukid (PHEV)**

###### **1.1.3 Hübriidelektrisõiduk (HEV)**

###### **1.2 Elektriautode põhilised tehnilised näitajad**

###### **1.3 ISEAUTO põhiparameetrid**

###### **1.4 Elektriautode laadimise moodused**

###### **1.4.1 Aeglased laadijad**

###### **1.4.2 Kiirlaadijad**

###### **1.4.3 Alternatiiv meetodid elektriautode laadimiseks**

##### **2.ELEKTRIAUTODE LAADIJATE MÕJU ELEKTRIVÕRGULE**

- 2.1 Elektriautode laadijate põhjustav pingelang elektrivõrgus
- 2.2 Elektriautode laadijate põhjustav pingete asümmeetria
- 2.3 Harmoonilised moonutused ja trafo elu vähendamine
- 2.4 Elektriautode laadijate põhjustavad kõrgemad harmoonikad
- 2.5 Võimalikud variandid probleemide lahendamiseks

### 3. TALTECH-I ELEKTRIVÕRK JA DLGSILENT-I VÕRGUMUUEDEL

- 3.1 TalTech-i elektrivõrgu lühikirjeldus
- 3.2 TalTech-i energeetikamaja koormused alajaamas

### 4. EESTI ISEJUHTIVAUTO – ISEAUTO

- 4.1 ISEAUTO projekti üldkirjeldus ja tuleviku areng
- 4.2 ISEAUTO laadimis süsteemi kirjeldus
- 4.3 ISEAUTO-de kasutamine TalTech-i võrgus
- 4.4 ISEAUTO ja TalTech-i elektrivõrgu koostöös
- 4.5 ISEAUTO-de kasutuse modelleerimine TalTech-i elektrivõrgus tarkvaraga DigSILENT
- 4.6 Elektriautode mõju ülekandevõrgule

### 8. Kasutatud kirjanduse allikad

- Teadusartiklid (DirectScience)
- „Elektritransport ja selle mõju elektrisüsteemi talitluse“ Uurimistöö Ivo Palu
- „Impact analysis of vehicle-to-grid technology and charging strategies of electric vehicles on distribution networks e A review“ - Journal of Power Sources
- “Grid harmonic impact of multiple electric vehicle fast charging” Electric Power Systems Research

### 9. Lõputöö konsultandid

Victor Astapov, Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut, teadur

### 10. Töö etapid ja ajakava

- Kirjanduse ja artiklite läbitöötamine (1.03.19 – 20.03.19)
- Töö ülesandelehe esitamine (11.03.19)
- Lähteandmete kogumine ja teoreetilise osa kirjutamine (20.03.19 – 10.04.19)

- Modelleerimise ja simuleerimise teostamine (10.04.19 – 20.04.19)
- Uuringu tulemuste kirjeldamine, järelduste ja kokkuvõtte koostamine (20.04.19 – 01.05.19)
- Töö esimene versioon valmis (1.05.19)
- Juhendajale läbilugemiseks saatmine (2.05.19)
- Töö teema deklaratsiooni esitamine (13.05.19)
- Paranduste sisseviimine, juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine (15.05.19)
- Töö lõplik versioon valmis (23.05.19)
- Töö esitamise tähtaeg (24.05.19 kell 15.00)



# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT.....	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	5
EESSÕNA.....	11
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU.....	12
SISSEJUHATUS .....	13
1. ELEKTRIAUTODE JA NENDE LAADIJATE ÜLEVAADE.....	14
1.1 Elektriautode tüübid.....	14
1.1.1 Akutoidega elektriauto (BEV).....	14
1.1.2 Laetavad hübriidelektrisõidukid (PHEV).....	15
1.1.3 Hübriidelektrisõiduk (HEV).....	16
1.2 Elektriautode põhilised tehnilised näitajad.....	16
1.3 ISEAUTO põhiparameetrid.....	17
1.4 Elektriautode laadimise moodused.....	19
1.4.1 Aeglased laadijad.....	19
1.4.2 Kiirlaadijad.....	19
1.4.3 Alternatiiv meetodid elektriautode laadimiseks.....	21
2. ELEKTRIAUTODE LAADIJATE MÕJU ELEKTRIVÕRGULE.....	23
2.1 Elektriautode laadijate põhjustav pingelang elektrivõrgus.....	23
2.2 Elektriautode laadijate põhjustav pingete asümmeetria.....	24
2.3 Harmoonilised moonutused ja trafo elu vähendamine.....	25
2.4 Elektriautode laadijate põhjustavad kõrgemad harmoonikad.....	26
2.5 Võimalikud variandid probleemide lahendamiseks.....	28
3. TALTECH-I ELEKTRIVÕRK JA DLGSILENT-I VÕRGUMUUEDEL.....	29

3.1 TalTech-i elektrivõrgu lühikirjeldus.....	29
3.2 TalTech-i energeetikamaja koormused alajaamas .....	31
4. EESTI ISEJUHTIVAUTO – ISEAUTO .....	33
4.1 ISEAUTO projekti üldkirjeldus ja tuleviku areng .....	33
4.2 ISEAUTO laadimis süsteemi kirjeldus.....	34
4.3 ISEAUTO-de kasutame TalTech-i võrgus .....	37
4.4 ISEAUTO ja TalTech-i elektrivõrgu koostöös.....	37
4.5 ISEAUTO-de kasutuse modelleerimine TalTech-i elektrivõrgus tarkvaraga DlgSILENT .....	37
4.6 Elektriautode mõju ülekandevõrgule .....	42
KOKKUVÕTE .....	43
SUMMARY .....	45
KASUTATUD KIRJANDUS .....	47
LISAD .....	52
Lisa 1 Elektriautode laadijate ühendused .....	53
Lisa 2 TalTech-i linnaku alajaamade skeem .....	54
Lisa 3 Energeetikamaja alajaama ühenduseskeem .....	55
Lisa 4 Trafode koormused alajamas .....	56

## EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema oli valitud autori poolt tänu selle et tänapäeval elektriautode kasutamine ja nende jaoks elektrisüsteemide talituse optimeerimine on hästi oluline maailmas. Autorile pakus see teema suur huvi, sest kõik need protsessid on otseselt seotud autori õpekavaga ja ka selles suunas tehakse nii maailmas kui ka Eestis palju uuringuid.

Töö enamik materjale on leitud online teadusartiklite andmebaasidest. Arvutiprogrammide abil oli tehtud simulatsioonid ja Tallinna Tehnikaülikooli elektrisüsteemi uurimine ja analüüs.

Lõputöö sai valmis Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi teaduri Anton Rassõlkin juhendamisel ja Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi teaduri Victor Astapov konsulteerimisel. Autor tahab avaldada nendele suur tänu.

## LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

BEV	akutoitega elektriauto ( <i>battery electric vehicle</i> )
CV	pidev vool (constant current)
CC	pidev pinge (constant voltage)
CCS	kombineeritud laadimis süsteem (Combo Charging System)
CHAdEMO	laadimisega liikumine (CHArge de MOve)
$f$	sagedus (frequency)
HEV	hübriidelektrisõiduk (hybrid electric vehicle)
kWh	kilovatt-tund (kilowatt hour)
Li-ion	liithium-ion (lithium-ion)
OCV	avatud vooluringipinge (open-circuit voltage)
PEV	pistik elektriauto (plug-in electric vehicle)
PHEV	pistikhübriid elektriauto ( <i>plug-in hybrid electric vehicle</i> )
PV	fotogalvaanilised paneelid (photovoltaic panels)
SOC	laadimise seisund (state of charge)
THD	kogu harmooniline moonutus (total harmonic distortion)
TDD	kogu nõudluse moonutus (total demand distortion)
V2G	elektriauto on integreeritud jaotusvõrku (Vehicle to grid)

## SISSEJUHATUS

Käesoleva bakalaureuse lõputöö põhiliseks eesmärgiks on uurida millised elektriautode laadimisvõimalused maailmas olemas ja kuidas laadijad mõjuvad elektrisüsteemidele. Samuti ka vaadata millised probleemid sellega kaastulevad ja kuidas nende mõju saab vähendada. Põhi uurimisobjektiks on ISEAUTO laadimis süsteem ning selle mõju Tallinna Tehnikaülikooli elektrisüsteemile.

Viimasel ajal on nii maailmas kui ka Eestis üha rohkem hakanud levima elektriautod, muidu peamine roll transpordisektoris on bensiin- ja diiselmootoriga autodel. Inimestel suureneb huvi elektriliste sõidukite järele, sest nad on keskkonna- ja energiasõbralikud. Siit tuleb ka vajadus nende laialdase kasutamise mõju täpsustamine ja uurimine, selle töö raames eelkõige vaadeldakse elektriautode laadijate mõju elektrisüsteemile.

Lõputöö raames vaadeldakse kaks põhi probleemi. Esimene on selles kuidas ISEAUTO kiirlaadija võib mõjuda Tallinna Tehnikaülikooli elektrisüsteemile. Teine probleem seisneb selles et kuidas ühefaasilised tavalaadijad võivad mõjutada Tallinna Tehnikaülikooli elektrisüsteemile ja millised koormused nad toovad ülikooli trafodele.

Töö esimeses pooles on toodud ülevaade elektriautodest. Millised elektriautod on maailmas olemas, nende tüübid ja põhiparameetrid. Suurem aktsent on pandud elektriautode laadimisüsteemidele ja elektriautode laadimise moodustele. Vaadeldaks põhjalikult ka elektriautode ühendusviisid elektrivõrguga. Töö esimene pool annab selge pildi sellest milline on elektriautode laadimise osas olukord maailmas ja millised tehnoloogiad kasutatakse.

Töö teises pooles on kirjeldatud millised elektrilaadijate mõjud võivad esineda elektrivõrgus ja millised võivad olla lahendused selleks, et selle mõju vähendada. Samuti vaadeldakse ka see, et kuidas elektriauto võib olla kasulik elektrivõrgule.

Kolmas ja neljas osa on autori uurimistöö seotud projektiga ISEAUTO – Eesti esimene isejuhtiv sõiduk. Antakse väike ülevaade projektist ja projekti tuleviku arengust ning ISEAUTO laadimisüsteemist. Peamiseks uuringu teemaks on ISEAUTO laadimis süsteemi mõju Tallinna Tehnikaülikooli elektrisüsteemile. Kasutades arvuti tarkvara (MATLAB, DigSILENT) leitakse optimaalsed võimalused ISEAUTO kasutamiseks Tallinna Tehnikaülikooli linnakul. Uuritakse ka kõige paremad kohad ISEAUTO-de laadimiseks. Aluseks on Tallinna Tehnikaülikooli elektriskeem ja ligikaudsed koormused hoonetes.

# 1. ELEKTRIAUTODE JA NENDE LAADIJATE ÜLEVAADE

Tänapäeval on kõige perspektiivikamas asendajaks bensiin- ja diiselmootoriga autodele on elektriauto. Järjest soodsamaks muutuvad elektriautod jõuavad prognooside kohaselt massidesse järgmise kümnendi keskel [1]. Samuti ka Euroopa ja maailma uuringud näitavad kasvav huvi elektriautode vastu, näiteks Aurora Energy Research uuringus [2], prognoositakse et 2035 aastaks võib Suurbritannia teedel olla kuni 10 miljonit elektriautoid. Elektriauto on kõigepealt auto, mis kasutab liikumiseks elektrienergiat ja liigub elektrimootori jõul.

Antud peatükis antakse lühike ülevaade elektriautodele ja nende laadimis võimalustele. Lisaks ka vaadeldakse alternatiiv meetodid elektriauto aku laadimiseks. Autor annab ka kiir ülevaade elektriautode põhi parameetritest ja isejuhtiva bussi ISEAUTO omadusest.

## 1.1 Elektriautode tüübid

Elektriautot käitab kas üks või mitu elektrimootorit, samuti on ka olemas hübriidautod, kus on pea mootoriks bensiin- ja diiselmootor ja lisa mootorina on elektrimootor. Selliseid sõidukeid on kahte põhilist tüüpi: akutoitega elektriautod (BEV – battery electric vehicle) ja pistikhübriid (PHEV – plug-in hybrid electric vehicles) [3]. Eraldi võib nimetada ka elektriautod mis kasutavad vesiniku. Kahjuks tänapäeval neid autosid on hästi vähe, puudub ka vajalik infrastruktuur vesiniku transpordiks ja auto laadimiseks linnades, kuid selles tehnoloogias on ka tulevik [4].

Elektriauto on oma ehituselt väga lihtne, on ka ülalpidamiskulud ja hoolduskulud madalad. Keskmiselt elektrimootoris on umbes 5 liikuvat/kuluvat osa, tavaauto mootoril seevastu sadu. Pole tarvis õlivahetust ega käigukasti hooldust. Ainuke kulu on seondub akuga. Elektriauto kilomeetri hind on mitu korda odavam kui sisepõlemismootoriga autol [3]. Elektriautodel on ka puudused, millised tuleb arvestada valides elektriauto põhi transpordiks. Teises peatükis autor toob välja põhi mõjud mis toovad elektriautode laadijad elektrivõrgule.

### 1.1.1 Akutoidega elektriauto (BEV)

Akutoitega elektrisõidukeid käitatakse üksnes akus salvestatud elektri abil. Neid tuntakse ka kui puhtalt elektrilisi sõidukeid. Neid laetakse ühendades sõiduk välise elektriallikaga, milleks võib olla tavaline elektripistik, spetsiaalne laadimisseade või üks paljudest üle riigi leiduvatest avalikest laadimisjaamadest. Aku taaskasutab ja salvestab ka auto pidurdamisel pidurite poolt toodetud

energiat, mida nimetatakse regeneratiivpidurdamiseks (rekuperatiivpidurdamiseks). Lisaks sellised autod ei tooda summutitorust väljuvaid heitgaase [3].

Akutoitega elektrisõidukid sobivad eelkõige inimestele, kes saavad neid öösel kodus või tööl laadida ja kes reisivad enamasti aku sõiduulatuse raadiuses. Sellised autod on näiteks: Hyundai Kona, BMW i3, Hyundai Ioniq, Kia Soul, Mitsubishi i-Miev, Nissan Leaf, Renault Zoe, Tesla Model S, VW e-Golf jpt [3]. Elektriautodele on ka mõelnud erinevad aku laadijad, nende hulgas võib nimetada kaks põhi tüüpi: aeglane- ja kiirlaadija. Nendega kaastulevad ka erinevad laadimis ajad ja edastavad võimuses. Edasi vaatleme need laadijate põhi omadused.

### **1.1.2 Laetavad hübriidelektrisõidukid (PHEV)**

Laetaval hübriidelektriautol on kahte tüüpi mootorid – elektrimootor ja aku, mida saab laadida välisest toiteallikast, ja sise põlemismootor, mis kasutab kütusena bensiini või diislit.

Enamik hübriidautosid käivituvad ja sõidavad ainult elektrirežiimis kuni enamus akus salvestatud energiast on ära kasutatud, pärast seda võtab bensiini- või diiselmootor automaatselt üle. Regeneratiivpidurdus laeb akut mõlemas režiimis. Tugeva kiirendamise ajal, nagu näiteks järsust mäest üles sõitmisel, töötavad bensiini- või diiselmootor ja elektrimootor koos, et vältida aku üleliigset tühjenemist [3].

Mõned laetavad hübriidelektrisõidukid kasutavad väikest bensiinimootorit elektrienergia tootmiseks, mida tuntakse sõiduulatuse suurendajana, et elektrimootorit toita, kui aku laetus väheneb alla teatud taseme. Laetavate hübriidelektrisõidukite sõiduulatus ainult elektrirežiimis erineb mudeliti märkimisväärselt. Mõned suudavad sõita ainult 15–20 km, mõned uuemad mudelid võivad sõita 60 km või rohkem [3].

Laetavad hübriidelektrisõidukeid sobivad eelkõige inimestele, kes saavad autot öösel kodus või tööl laadida ja kes reisivad enamasti aku sõiduulatuse raadiuses. Sellised autod on näiteks: Audi A3 e-tron, Mitsubishi Outlander PHEV, Toyota PlugIn Prius jt [3].

Võrreldes bensiini- või diiselmootoriga sõidukiga on laetaval hübriidelektrisõidukil madalamad ülalpidamiskulud ja väiksem keskkonnamõju, kui teete enamiku sõitudest elektrisõiduki režiimis. Laetavad hübriidelektrisõidukid võivad olla ostmisel kallimad kui nendega võrdsed bensiinil ja diisilil sõitvad autod. Kuna neil on bensiini- või diiselmootor, on hoolduskulud tõenäoliselt umbes samad

kui tavalistel sõidukitel. Nagu akutoitega elektrisõidukite puhul, rekuperatiivpidurdus hoiab ära pidurite kulumist. Paljusid laetavaid hübriidelektrisõidukeid ei saa kiirlaadida [3].

### **1.1.3 Hübriidelektrisõiduk (HEV)**

Hübriidautod on autode tüüp, mis ei ühendu laadimiseks välise elektritoite allikaga ja ei ole otseselt elektriautod. Akut laetakse bensiini- või diiselmootoriga ja rekuperatiivpidurdusega. Hübriidid on efektiivsemad kui tavalised bensiini- või diiselmootoriga sõidukid ja need toodavad vähem heitmeid.

Hübriidautod kasutavad sõitmiseks mitut energiaallikat – elektrimootor ja sise põlemismootor. Akusid laadib elektrigeneraator, mille paneb pöörlema sise põlemismootor. Viimane töötab siis, kui kütusekulu saab hoida miinimumi lähedal. Enamasti mõistetakse hübriidauto all elektriautot, millel on ka sise põlemismootor [3].

Elektrimootori kasutamisel saab auto mootor energiat elektriakudest. Hübriidauto sise põlemismootor paneb auto transmissiooni kaudu, kas otseselt liikuma ja käitab samal ajal ka akude laadimiseks vajalikku elektrigeneraatorit või käitab ainult elektrigeneraatorit. Sise põlemismootor töötab modernsematel hübriidautodel enamasti siis, kui kütusekulu on vaja hoida optimumi lähedal. Sise põlemismootor peab hakkama tööle ka siis kui akud on teatud piirini tühjenenud ja elektrimootor ei saa seetõttu enam piisavalt elektrit [3].

Elektrimootorit kasutatakse eriti kiirendamisel, sõidu alustamisel ja aeglastel kiirustel, sest siis on sise põlemismootoril suur kütusekulu ja heitgaaside kogus. Lisaks on elektrimootoril suurema kasuteguri tõttu sama võimsuse juures suurem kiirendus. Tänapäeval on tuntumad hübriidautod Honda Insight ja Toyota Prius.

## **1.2 Elektriautode põhilised tehnilised näitajad**

Selleks et kaugele saaks elektriautoga sõita peaksid elektriauto tehnilised näitajad selleks olema sobivad. Elektriautode akude mahtuvus mõõdetakse kWh nagu ka tavalise elektritarbijatele. Need kWh võib võrrelda vedeliku kütusega sise põlemismootoriga auto mõistes. Otseselt ei ole võimalik võrrelda täislaetud elektriauto akut vedeliku kütusepaagiga. Elektriauto aku ei saa kunagi 100% kasutada. Aku kasutatav maht on tavaliselt 60-70%, mis ka garanteerib elektriauto juhtsüsteemide stabiilsus ja turvalisuse kontroll sõiduajal. Näiteks Tesla lehel on iga elektriauto mudeli juures aku



mahtuvus, see info on pigem informatiivne ja kasutatakse müügi argumendina, kuid mitte otseselt võrreldav vedeliku kütusepaagiga autoga [5].

Aku mahtuvust võiks nimetada elektriauto põhinäitajaks kuid siis kohapeal on ka oluline akude vastupidavus, see kindlasti sõltub sõidustiilist. Kui liikuda ühtlasema kiirusega siis saab ka kaugele jõudma. Pidev pidurdamine ja kiirendamine vähendab olulist võimaliku läbisõidu võimalust, nagu linnas sõitmine ja maanteel. Bensiini- või diiselmootoriga autodel on siin kohapeal ka erinevus kütuse tarbimisel.

Tänapäeval esimesel kohal suurema läbisõiduga on Tesla autotootja [5]. Nemad kasutavad oma autos akud kõrgema energiatihedusega mis võimaldab saavutada suuremat mahtuvust ja pakkudes autoomanikutele läbisõidu rohkem kui 400 km. Iga aastaga teadlased teevad töö selles suunas mis võib oluliselt parandada liitium-ioon akusid ja pikendada läbisõidu ühe laadimisega [5].

### **1.3 ISEAUTO põhiparameetrid**

Käesoleva bakalaureuse lõputöö raames põhiuuringu objektiks on ISEAUTO ja tema mõju Tallinna Tehnikaülikooli elektrivõrgule, seega on mõistlik vaadelda ka ISEAUTO põhilised tehnilised parameetrid. ISEAUTO-s kasutatakse Mitsubishi i-MiEV komponendid. i-MiEV on loodud, kasutades Jaapanis alates 2006. aastast müüdava pisiauto Mitsubishi i-keret – nii ongi sellekujuline auto on sealmaal saadaval nii tava-kui ka elektriversioonis [6].

Kui tavalisel „i“-l kasutatakse kolmesilindrilist 660 cm<sup>3</sup> turboga bensiinimootorit, siis nüüd on jutt puhtalt elektrisõidukist. Bensiinimootori asemel kasutatav elektrimootor (samasuguse 63 hj võimsusega, kuid märgatavalt parema momendinäiduga – 85 Nm asemel tervelt 180 Nm) on sarnaselt i-bensiinimootoriga integreeritud hoopis auto tagasilda. Ja tulemus – 100 km/h on hoolega „gaasi“ andes spidomeetril umbes 15 sekundiga, kusjuures sisuliselt vaid õhuvihinate ja rehvimüra saatel. Energiat ammutab i-MiEV auto põhja alla peidetud 88 liitiumioonakust moodustatud ca 200 kg kaaluvast energiaallikast [6].

Mitsubishi i-MiEV juures on läbisõit küll probleemiks, kui linnas ajab 160 km ressursi asja ära, siis pikemate otste tegemisel mitte. Ja antud juhul ei ole nii, et kui „kütusetuluke“ põlema läheb, sõidad esimesse ettejuhtuvasse tanklasse ja ongi mure murtud! Tõsi, on ka kiir laadimisvõimalus – sel juhul saab aku täis ca 80% ulatuses poole tunniga ja see on aeg, mida nt Tallinnast Tartusse sõites kusagil Mäol kohvipausiks pruukida sobib.

ISEAUTO projekt algas eelmise aasta (2017) suvel ja reaalse arenduseni jõuti täpselt aasta tagasi. Aasta jooksul arendati Tallinna Tehnikaülikoolis (TalTech-is) peamiselt sõiduki tarkvara, juhtimiselektronikat ja andurid. Silberauto AS-is projekteeriti ja ehitati sõiduki kere.



Joonis 1.1 Elektriauto Mitsubishi i-MiEV [7]

ISEAUTO mootoriks on 47kW elektriline mootor, mis suudab vedada 4+2 sõitjaid kiirusega 10–20 km/tunnis, seeks on ISEAUTOs 16kWh aku, mis toidab ära nii mootorit kui ka kogu elektronikat, samuti ka LiDAR-id, kaamerad ja kõik andurid [8].

Kogu Iseauto projekt jätkub ja laieneb eelkõige targa linnaku temaatikasse, kuid edasi ehitatakse ka sõidukit, kuna valmislahenduseni on veel pikk tee minna. Juba praegu on kuulutatud välja ideekonkurss, kuidas isejuhtivad sõidukid lähitulevikus kasutusele võtta ja integreerida need olemasolevasse transpordisüsteemi [8].



Joonis 1.2 Isejuhtiv buss ISEAUTO [8]

## 1.4 Elektriautode laadimise moodused

### 1.4.1 Aeglased laadijad

Aeglased laadijad on enamuses madala võimsusega laadijad. Neid kasutatakse enamasti kontoris, kodus, parklates, garaažis. Elektriauto laadimine aeglase laadijatega võtab keskmiselt 6 kuni 18 tundi, sõltuvalt laadija omadusest ja auto aku mahtuvusest. Eramajapidamises on tavaliselt kasutusel laadijad mille maksimaalne võimsus on 3.6kW pingel 230V või siis ka teine variant 3kW pingel 230V, mis vastab 16A ja 13A voolule.

Aeglane elektriauto laadija on hea sel juhul kui läbitavad vähemad elektriautoga on väikesed. Eramajades saab kerge vaevaga hankida laadijat, kui elektri teenusepakkujaga on sõlmitud elektriliitumine võimaldab lisada süsteemile lisaks 13 kuni 16A vooluga tarbija.



Joonis 1.3 Madala võimsusega laadijate pistikutüübid [13]

Madala võimsusega laadijate kitsaskohaks on kõigepealt nende laadimisekiirus, mis suure mahtuvuse tühja aku laadimine võib võtta rohkem kui 16 tundi. Teiseks probleemiks on ülekoormus ja faaside mitte sümmeetriline koormamine majapidamisest. Need probleemid autori poolt vaadeldakse teises peatükis, kus täpsemalt uuritakse olulised mõjud.

### 1.4.2 Kiirlaadijad

Kiirlaadimine on kiire, kuid täpne laadimisaeg sõltub väga palju sellest, kui palju on eelnevalt akus elektrit sees ning muidugi elektriauto aku mahtuvusest. Vähem mängivad rolli ilmastikuolud. Kiirlaadimise kiirus muutub laadimisprotsessi jooksul - mida enam akud täituvad, seda aeglasemalt laetakse, et vältida akude kuumenemist. Siiski võib öelda, et 16kWh akuga elektriauto keksmine orienteeruv laadimisaeg 0-80% jääb vahemikku 20-40 minutit [9].

Maailmas on olemas väga erinevad elektriautode kiirlaadimise võimalused. Mis erinevad teine teist kõigepealt parameetrite järgi, kui enamuse kiirlaadijatest on alalisvooluga laadijad. Samuti see

mõjub ka elektriauto omanikule, sest on elektrilaadijate pistikute tüüpide arv on hästi suur ja iga riik ja elektriautode tootja võib kasutada oma tehnoloogiat ja ühenduse variandid. Joonise 1.4 on kujutatud erinevad laadimise võimalused maailmas. Sellest tabelist on hästi näha et parameetrid ja ühendused on igal pool erinevad. Näiteks, Eestis ELMO kiirlaadimise programmi raames paigaldatud kiirlaadijad sobivad ainult teatud elektriautode tüüpidele, mis on varustatud CHAdeMO [11] laadija pistikupesaga, teisi pistikutega varustatud elektriautod seal laadida ei saa [10]. Eestis on praeguseks rajatud kiirlaadijate võrgustik põhineb CHAdeMO laadijatel ja tulemas ka CCS elektriautode laadimis süsteem.

Standards								
	SAE J1772	IEC 61851-1	GB/T	SAE J2847/2, ISO 15118	DIN 70121:2014-12, ISO 15118	GB/T 27930-2015	CHAdeMO	Tesla
Charging	AC, single-phase	AC, single-/three-phase	AC, single-phase (three-phase reserved)	DC	DC	DC	DC	AC + DC
Communication type	Basis	Basis	Basis	High-level	High-level	High-level	High-level	High-level
Communication interface	PWM, resistor network	PWM, resistor network	PWM, resistor network	PWM, resistor network, and TCP/IP based on PLC	PWM, resistor network, and TCP/IP based on PLC	CAN J1939	CAN	Internal standard
Plug	IEC 62196-2 Type 1 (SAE J1772/2009)	IEC 62196-2 Type 2 (VDE-AR-E 2623-2-2)	GB/T 20234.2-2015	IEC 62196-3 Combined Charging System Type 1	EN 62196-3 Combined Charging System Type 2	GB/T 20234.3-2015	IEC 62196-3 Type 4 (IEVS G105-1993)	Modified pin assignment of IEC 62196-2 Type 2
Connector type								
Power	Up to 19.2 kW	Up to 43 kW	Up to 22 kW	Up to 75 kW	Up to 100 kW		Up to 100 kW	Up to 135 kW
Region								

Joonis 1.4 Elektriautode kiirlaadijate ühenduspistikud [12]

CHAdeMO ühenduse pistikud on kasutusele võetud autotootjate poolt nagu Toyota, Nissan ja Mitsubishi aastal 2010. Need on hästi levinud näiteks Jaapanis ja enamik kiirlaadijatest on seal seda tüüpi. 2015. aasta lõpuks oli maailmas kasutusel rohkem kui 10 000 CHAdeMO kiirlaadijat. CHAdeMO on alalisvooluga kiirlaadijaga, mis maksimaalselt võib anda väljundisse 100 kW. See standart lubab kasutada ühe pistikuga nii kiir- kui aeglane elektriauto laadimine, mis toob ka autoomanikule võimalus laadida oma auto tavavõrgust kui kiirlaadimise võimalust kohapeal puudub [13].

CCS – (Combo Charging System) on kombineeritud elektriautode laadimise süsteem. See süsteem valmistati 2011. a ja on rohkem mõelnud saksa autodele, näiteks BMW i3 ja Volkswagen e-Golf. [13]. Samuti nagu CHAdeMO võimaldab laadida võimsusega kuni 100kW ja toetab ka aeglane laadimine, kuid pistikud oma vahel ei sobi.

Type 2 – on kiirlaadija mis laadimiseks kasutab vahelduvvoolu, lubab kasutada kiirlaadimiseks kolmfaasi maksimaalse võimsusega kuni 43kW või ka aeglane ühefaasiga laadimine kuni 3kW. Selle süsteemi võib leida autodel nagu Renault ZOE [14].

Tesla Type 2 – on spetsiaalne Tesla Motors-i poolt välja toodud ja ei ühildu teiste standartidega, mõelnud on ainult Tesla autodele ja kasutab alalisvoolu. Selline pistiku standart annab võimalust kasutada Tesla superlaadijat mis lubavad maksimaalne väljud võimsus kuni 120kW. Tesla Motors annab oma elektriautodele ka adapter-üleminekud mis lubavad elektriauto omanikutele laadida ka CHAdeMO ja CCS laadijatega, kuid teised autoomanikud ei saa laadida oma autod Tesla laadijatega [14].

Hetkel Eestis on ELMO kiirlaadimise programiga on levinuim CHAdeMO tüüpi kiirlaadija ja juba olemas kiirlaadijate võrgustik [21]. Seega võib ka öelda et Eesti rohkem toetab Jaapani autotootjate poolt ehitatud elektriautosid, need autosid mis omavad või toetavad CHAdeMO kiirlaadija pistikupesa. Jaanuaris 2019 teatas suur kütuse müüja Circle K, et Eestisse tulevad ka CCS superlaadijad ja ettevõtte tegeleb selles suunas, eesmärgiks on see, et tanklates oleks „kõik ühes kohast“ ja 2019 aasta lõpuni plaanib avada oma bensiinijaamades kaks CCS superlaadijat. Lisas 1 on välja toodud laadijate pistikute standardid, laadija pinged ja voolud [15].

### **1.4.3 Alternatiiv meetodid elektriautode laadimiseks**

Lisaks tavalisele meetoditele nagu aeglane- ja kiirlaadimine, millal elektriauto ja laadija on ühendatud kaabliga, maailmas on olemas erinevad projektid ja uuringud, mis kasutavad teisi tehnoloogilisi lahendusi ja lubavad laadida elektriautosid teistmoodi. Nende hulgas näiteks selline laadimise variant nagu „Battery Swap“ ehk aku vahetus. Selline variant baseerub kuu põhisel maksmisel, mis lubab auto omanikule lepingu alusel vahetada oma tühi elektriauto aku laetud aku vastu. Eeliseks võiks nimetada see, et aku saab laetud 1 minutiga ja sõiduvahemaa on piiramatult, nii kaua kui on olemas piisavalt laadimis (aku vahetamise punkti). Lisaks sellele aku vahetus võib käia täitsa autonoomselt ja autojuht ei pea ka muretseda aku pärast. Aku hooldus ja laadimine jääb laadimispunktide vastutuseks. Kasutamata ja laetud akud saab kasutada kohaliku elektrivõrgu toeks, kasutades V2G tehnoloogiat (vehicle to grid) [16].

Aku vahetuse varianti suureks puuduseks on kindlasti selle infrastruktuuri ehitamine ja arendamine, võib ka juhtuda et kuuline leping on kallim lõpptarbijale kui tava laadimispunktide kasutamine. Lisaks ka see, et ei ole akude üht standardi, elektriautode tootjad kasutavad oma autodes erinevad

lahendused ja akude mahtuvused, see on majanduslikult kahjulik hoida laadimispunktis erinevad akud erinevatele autodele [17].

Teine alternatiiv meetod on elektriauto laadimine juhtmevaba tehnoloogiaga mis töötab elektromagnetilise induktsiooni põhimõttel [18]. Üks mähis on pandud elektriauto põhja alla või aku alla ja teine mähis on laadimisplatsil asfaldi või teise pinna katte all. Selle tehnoloogia suureks puudeseks on väike energia hulk mis on võimalik laadija poolt elektriautole üle anda. Tuleb tõsta laadimis süsteemi sagedus üle 100kHz mis tekitab ka suuri ümberlülitamise kaod. Laadimise algus hakkab siis kui elektriauto pargitakse laadimisplatsile ja lõpeb siis kui aku on täis laetud. Juhtmevaba laadimise tehnoloogia on tuleviku teema mis leidub ennast linnades elektribusside kasutamisel, tänu sellele et mugav ja paindlik [19,20].

## **2. ELEKTRIAUTODE LAADIJATE MÕJU ELEKTRIVÕRGULE**

Tänapäeval maailmas seoses elektriautode hulka kasvamisega pööratakse rohkem ja rohkem tähelepanu sellele et milline on praegune elektriautode mõju elektrivõrgutele ja mida võib oodata lähenemisel tulevikus. Areng selles suunas käib aktiivselt ja paljudes riikides juba pakutakse erinevad laadimisvõimalused ja laadimisjaamu [21]. Näiteks Eesti sõlmis 2011. aastal märtsis Mitsubishi Corporationiga lepingu, et algatada Eesti elektromobiilsuse programm. Programmi eesmärgiks on kiirendada elektriautode kasutuselevõtmist Eestis ja aidata kaasa riigi poolt võetud eesmärgi täitmisele taastuenergia kasutuse suurendamisel transpordis aastaks 2020 [21].

Kindlasti arusaadav ka see, et laiaulatuslik elektriautode kasutamine maailmas mõjutab iga riigi elektrisüsteemi ja elektrivõrgule ning toob ka kaasa tehnilisi probleeme. Olulisemaks võib nimetada koormuse kasv, elektrienergia kvaliteedi muutumine, elektriautode laadimise ebaregulaarsus, elektritootmise ja ülekandevõimsuste defitsiit ja paljud teised.

Eesti elektritranspordi uurimistö [23], mis oli tehtud 2014 aastal näitas, et elektriautode laadimise tõttu lisanduvad koormused võivad endaga kaasa tuua ulatuslikke pingelange liitumispunktides. Samuti võivad suurenevad harmoonikate vood ja pinge asümmeetria ületada võrgu ettevõtjate poolt kehtestatud lubatud piire. Kõige enam avaldavad kõrgemate harmoonikate vood mõju jaotusvõrgu trafodele ja kaablitele ning klientide seadmetele. Tulemuseks võivad olla seadmete eluea vähenemine ning ettearvamatud avariid [22, 20].

Selles peatükkis autor vaatleb olulised mõjud elektrivõrgule, nende tekitamise iseloomustus ja põhjused. Lisaks ka vaadeldakse võimalikud elektriautode laadimisega probleemide lahendused.

### **2.1 Elektriautode laadijate põhjustav pingelang elektrivõrgus**

Elektriautode kiir- ja aeglased laadijad põhjustavad lisa pingelangu elektrivõrgus. See tingitud sellega et need on elektrilised seadmed mis hästi tarbivad voolu ja nõuavad piisavalt võimsust elektriauto aku laadimised. Aeglane laadija tarbib vähem kuid piika perioodi jooks, kiirlaadija võtab korraka rohkem, kuid kiiremini laeb ka aku. Elektriautode hulka kasvamisega tuleb arvestada sellega et see lisanduv koormus põhjustab trafodel ja kaablites lisa pingelangu. Suurem pingelang võib tekitada need kohtades ja eramajades mis asuvad toitealajaamast kaugel ja elektriauto omanikud ikka tahavad oma autod laadida. Siin kohapeal tuleb kindlasti uurida elektrivõrgu nõrgemaid kohti ja analüüsida halvimaid stsenaariume [26].

Uuring [24] näitab, et pinge lang võrgus sõltub liini pikkusest ja sellega tuleb arvestada. Lahtunud on nii linna kui ka maapiirkonna elektrivõrgutust ning uuringus on hinnatud liini pikkust kahe kuni kaheks elektriauto laadimiseks. Tulemuseks tuli see, et kuni 700 m pikkuse liini lõppu on võimalik ühendada kuni kaks autot, ilma võrgu parameetreid rikkumata. 300 m liini lõpus on selleks arvuks vastavalt kuni kaheks autot [20, 24].

Põhja- ja kesk Euroopa talviste ja suviste koormustele lisanduvad elektriautode laadimisvõimsuste mõjud. Lisaks on ka tarbimise mõjud ja suurem koormus elektrivõrgutele, täpsemalt kirjeldatud allikas [25]. Arvestades erinevaid tarbimisaegu ja võimsustippe on jõutud järeldusele, et 10% ja 20% elektriautode osakaalu juures jääksid pingelangud ena- masti alla 10%. 10%-ne pingelang ilmnes simulatsioonide tulemustest alles üle 30% elektrialu tõde osakaalu juures [23].

## 2.2 Elektriautode laadijate põhjustav pingete asümmeetria

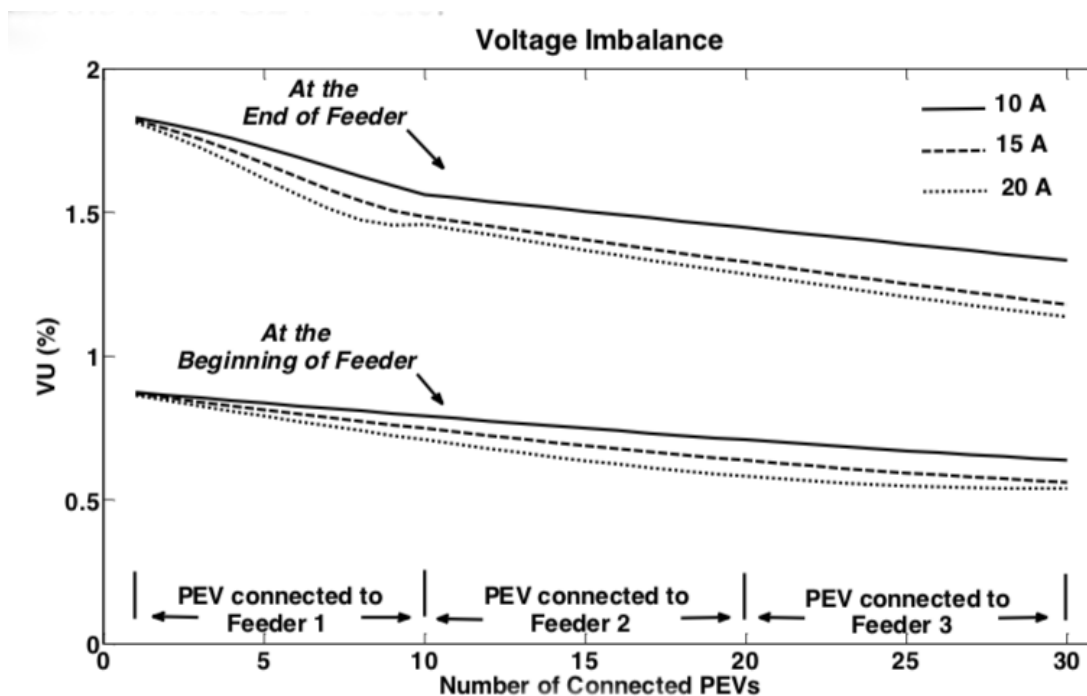
Ideaalne toitepinge on pinge, mis oma omadustelt on ideaalilähedane. Toitepinge ideaalsed parameetrid on sätestatud standardiga. Toitepinge kvaliteedinäitajatega on võimalik anda hinnang reaalse toitepinge erinevusele ideaalsest. Elektri kvaliteeti saab hinnata võrreldes reaalse pingeparameetrid ideaalse pingega. Pinge moonutusi reaalsest on võimalik kategoriseerida vastavalt olemusele ning tekkepäritolule. Erinevate pingemoonutuste piirväärtusi käsitleb Eesti Vabariigi standard EVS-EN 50160 [27].

Asümmeetria tegur on üks parameetritest, millega saab hinnata tekkitava asümmeetriat. Hindamisel saab lahtuda kahest piirväärtusest – kas standardiga EVS-EN50160 seatud piirväärtusest 2% või soovitatavast piirväärtusest 1%. Asümmeetriateguri maksimumväärtusena ületab 2% piirväärtuse 7% mõõtetulemustest ja 95% väärtusena ainult üks juhus kõigist mõõtetulemustest. Asümmeetriateguri soovitusliku piirväärtuse 1% ületab maksimumväärtusena 30% mõõtetulemustest ja 95% väärtusena 13% tulemustest. Asümmeetriateguri keskmine maksimumväärtus oli 1,0 maksimumväärtustest ja 0,8 95% väärtustest. Seega on asümmeetriateguri väärtus suures osas mõõtetulemustest standardiga lubatud piirides ja keskmiselt ka soovituslikes piirides kuni 1% [28].

Elektriautode laadijate lisanduv asümmeetria sõltub kõigepealt laadimisvoolu suuruselt [23]. Lisaks võib esineda pingeasümmeetria fiidri erinevates punktides [20, 26]. Uuringus ja simulatsioonis [29] eeldatud 30% elektriautode laadijate osakaalu ja 20A voolu juures leitud keskmiseks



pingeasümmeetria väärtuseks on 1,9%, kuid 34% juhtudest ületas pikima fiidri lõpus pingeasümmeetria 2% [23]. Joonisel 2.1 on kujutatud pingete asümmeetriat fiidri alguses ja lõpus, vastaval ühendatud elektriautode arvule ja tarbitavale laadimisvoolule [29].



Joonis 2.1 Pingete asümmeetria fiidrites, vastavalt elektriautode arvule [29]

Tänapäeval suurem osa elektriautode laadijast on ühefaasilised aeglased laadijad. Arvestades, et autode hulk aastatega kasvab, mis võib tekitada pingete asümmeetriat faasides, kui koormused ei ole võrdselt jagatud. Elektriauto laadimine erineb teistest tarbijatest selles, et tavaliselt aeglane laadija laeb akut keskmiselt 6-8 tundi, et saavutada vähemalt 80% mahtuvusest. Siis on raske prognoosida tekitavaid koormusi ja see loob omakorda võimaluse, kus teatatud hetkedel on tarbimine ühes faasis siiski märgatavalt suurem. Selline voolude erinevus võib tingida pingete asümmeetria jaotustrafos ning ka märgatavad voolud neutraaljuhhis [23].

## 2.3 Harmoonilised moonutused ja trafo elu vähendamine

Harmooniline moonutus on moonutus mis on põhjustatud elektrivõrgus olevate mittelineaarsete komponentidega ja genereerib elektriahelas paljusi uusi harmoonilise komponente, mis asetsevad originaalsignaale, luues lainekuju moonutatud signaali [30]. Iga harmoonilise tekitatav moonutus on peidetud, mis on summaarne harmooniline moonutus, ja selle väärtus väljendatakse protsendina väljundsignaali kõigi harmooniliste kesk väärtuse suhte väärtusest põhipingest

efektiivväärtusesse. Siin on põhisignaali sisendsignaali, ja kõik harmoonilised signaalid on harmoonilised signaalid, mis on sisse viidud mittelineaarse moonutusega. On selge, et mida väiksem protsent on, seda väiksem on harmooniline moonutus ja seda paremini ahelate töö [30].

Enamus elektroonika seadmeid on mittelineaarsed ja toodavad harmoonilised moonutused oma töö käigus ning edastavad neid elektrivõrgule nii voolu kui ka pinget kujul. Summaarne moonutustegur (THD) sisaldab signaali harmoonilised, näitab harmooniline energia protsendina kogu signaali energia (põhiline pluss kõik harmoonilised) [30]. Mõiste harmoonilised moonutused on seotud energiavooga, mille sageduslik hulk on kõrgem kui võrgu sagedus. Ideaalsel juhul voolu ja pinget lainekuju on siinuselane, siis reaal olukorras on nii vool kui ka pinget moonutatud kujuga perioodilised protsessid. Moonutatud siinuskujuga protsesse saab esitada kasutades Fourier teisenduse, kus esinevad erineva sagedusega siinused komponendid. Põhikomponendi sagedus on Eestis 50 Hz ja ülejäänud komponentidel mingi põhisageduse kordne sagedus. Igal komponendil on ka oma amplituudväärtus ja algfaasinurk [28].

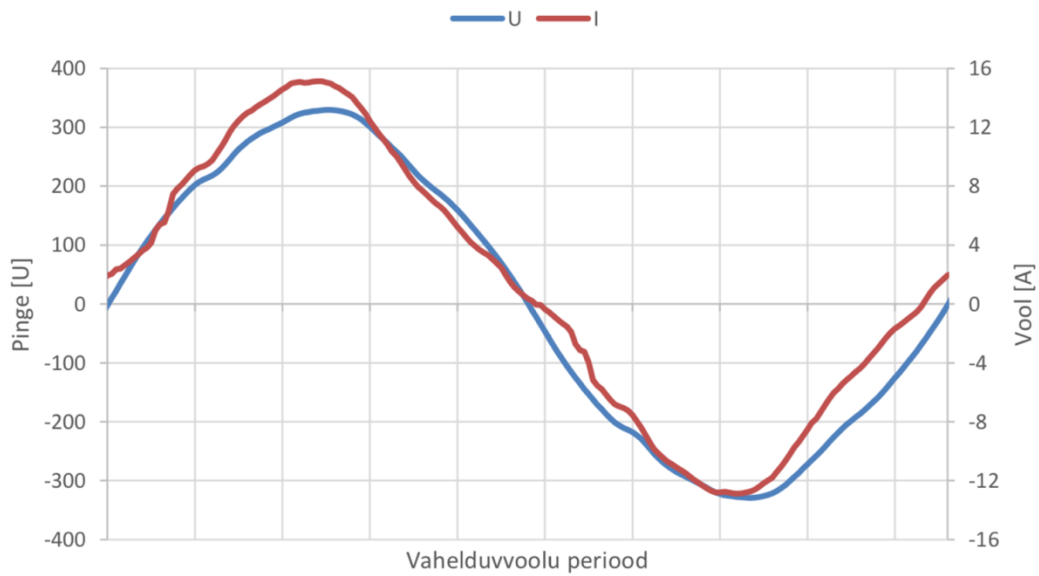
Kui pinget- või voolukõvera mõlemad poolperioodid on sama kujuga (ehk alaliskomponent puudub), siis Fourier-i reas ainult paaritud harmoonilised. Harmoonilisi iseloomustatakse sagedusega või nende järguga, milleks on nende kordsus põhiharmoonilise suhtes, vastavalt. Mittelineaarse seadme voolu- või pinget harmooniliste hulk võib olla ajas püsiv (näiteks mõned luminofoorlambid) või ajas muutuv hulk, erineva amplituudiga ja sagedusega (näiteks elektriautode laadijad, pingemuundurid, keevitusseadmed jne) [28].

## **2.4 Elektriautode laadijate põhjustavad kõrgemad harmoonikad**

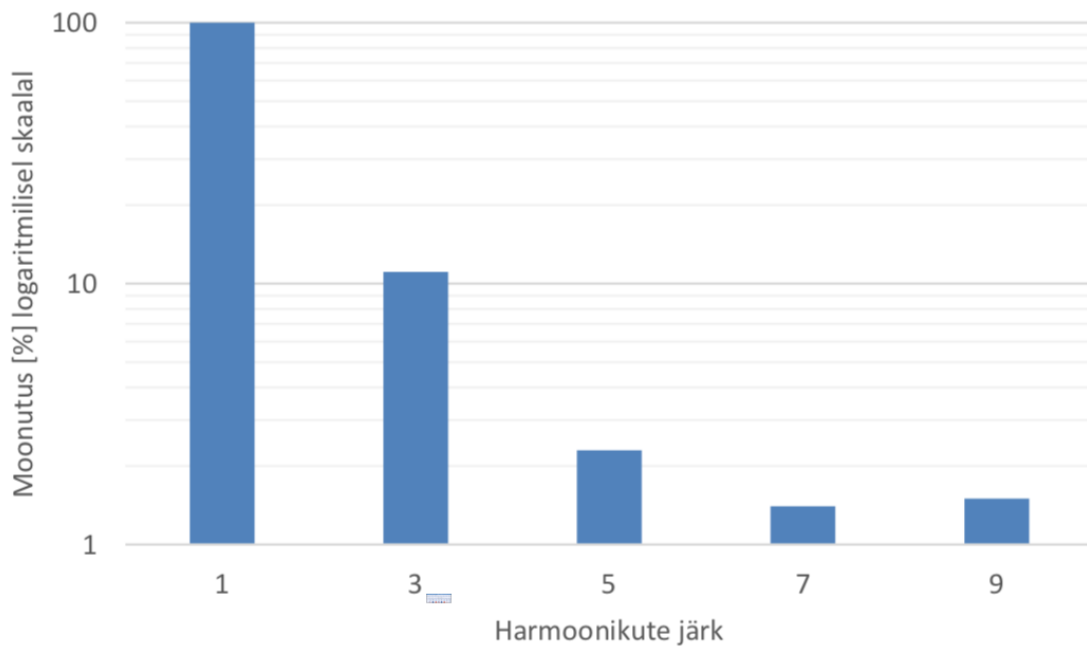
Elektriautode laadijatega seotud kõrgemad harmoonikad on otseselt seotud laadijate tehnilise topoloogiaga ja kasutava elektroonika komponentide baasiga. Näiteks, elektriauto akude aeglase laadijaga laadimiseks on vajalik alalispinge. Selleks, et vahelduv võrgupingest teha alalispinge on kõige lihtsam võimalus kasutada täisperioodalaldit. Sellise kontrollimata juhtimisega alaldi miinuseks on suured voolu harmoonikate väärtused. Esimese generatsiooni laadijate mõõtmis tulemused näitavad, et laadimisvoolu moonutuseks THD on keskmiselt 50%. Tänapäevaste juhtimis- süsteemidega alaldid võimaldavad laadimisvoole aga isegi alla 5%, kui laetakse suurema kui 50% nimivõimsusega [31].

Eesti elektertranspordi aruandes [23] on välja toodud erinevad graafikud mis hästi näitavad laadimis protsesside voolud ja pinged. Näiteks, joonisel 2.2 on välja toodud voolu- ja pinget kõverad

elektriauto laadimise ajal, on hästi näha, et vool ja pinge ei ole ühtlased. Moonutused esinevad nii voolu- kui ka pingekõveras ja põhjuseks on kõrgemad harmoonikad mis on juba olemas elektrivõrgus ja need harmoonikad mis tekib elektriauto laadimis seade.



Joonis 2.2 Toitepinge ja voolu siinuskõver elektriauto laadimise ajal [23]



Joonis 2.3 Elektriauto laadimisvoolu moonutus harmoonikute kaupa [23]

Joonis 2.3 kajastab siinuskuju rikkuvate kõrgemate harmoonikute sisaldust. Uuringud [23] näitavad, et täpsate hinnangute koostamiseks tuleb arvestada iga auto laadimis kõvera eripära, modelleerides erinevad laadimis stsenaariume uuritavas elektrivõrgus. Lisaks ka arvestada, et laadijate arvu kasvuga elektrivõrgus võib ka suurenema harmoonikate omavaheline sumbumine.

Voolu harmoonikad võivad omakorda põhjustada märgatavaid pingeharmonikaid. Üldiselt on jaotusvõrkudes lubatavaks pingemoonutuse määraks THD 8% [23], kuid tihti kehtestatakse ka madalamaid piire.

Kirjeldatud on ka juhtumeid, kus elektriautode lisandumine ei too kaasa pingemoonutuste kasvu, kuna toimib efektiivne harmoonikate sumbumine. Märkida tuleb, et kodumajapidamise koormustest ja elektriautode laadimistest koosnevate voolude harmoonikaid ei ole kindlate järelduste tegemiseks veel piisavalt laialdaselt uuritud [23].

## **2.5 Võimalikud variandid probleemide lahendamiseks**

Uuringud [33] näitavad et koordineeritud viitega laadimise süsteemid võivad kompenseerima tipp tundides tekkiv koormus trafodele ja parandada pingereguleerimine elektrivõrgus. Lisaks PV (photovoltaic panels) fotogalvaanilised paneelid vähendavad power factori põhi fiideris päeva sees. Päikese paneelide levik võib olla üks variantidest mis lahendaks elektriautode laadijate mõju elektrivõrkudele. Siiski teadlased leiavad, et tuleb ka kaaluda PV leviku maailmas ja arvestada ka esitavad erinevused iga riigi elektrisüsteemis [33].

Hea potentsiaaliga on ka V2G tehnoloogia mis lubab mõned PEV elektriautod kasutada elektrivõrgu võimuste tipp tundides kompenseerimiseks. See kontseptsioon toob eelistused nagu sageduse ja pingekontrollimine, kuid on ka suure puudusega, mis mõjub kõigepealt elektriauto akule, mis puudutab aku laadimise ja maha laadimise tsüklite kasvu ning tühjenemise sügavusele. Aku lagunemise maksumus on tänapäeval kõrgem kui kasu mis see tehnoloogia võiks anda elektrivõrgutele [31].

### **3. TALTECH-I ELEKTRIVÕRK JA DLGSILENT-I VÕRGUMUUEDEL**

Selles peatükis uurimiseks on võetud Taltech-i elektrivõrk, vaatleme millised põhielemendid on esitatud ja millised koormuse mõjud võib ISEAUTO-de laadimise seadmed tekitada elektrivõrgule.

Aluseks on võetud teadur Victor Astapov poolt esitatud andmed TalTech-i elektrivõrgu kohta. Samuti tema poolt autor sain ka andmed trafode, kaablite, kaitselülitite ja võrguseadmete osas. Mõned andmed on konfidentsiaalsed. Andmed koormuste kohta on 2014 a. omad.

Võrgu mudeli koostamiseks ja analüüsimiseks oli valitud hea võimalustega DlgSILENT arvuti tarkvara, mis lubas autorile kasutada kõik olemasolevad võrgu ja seadmete parameetrid, sel hulgas on trafode võimsused, kaablite tüübid ja pikkused. Simuleerida päeva koormused võrgus ja ISEAUTO laadijate laadimis tsüklid, arvestades li-ion aku laadimise omadused.

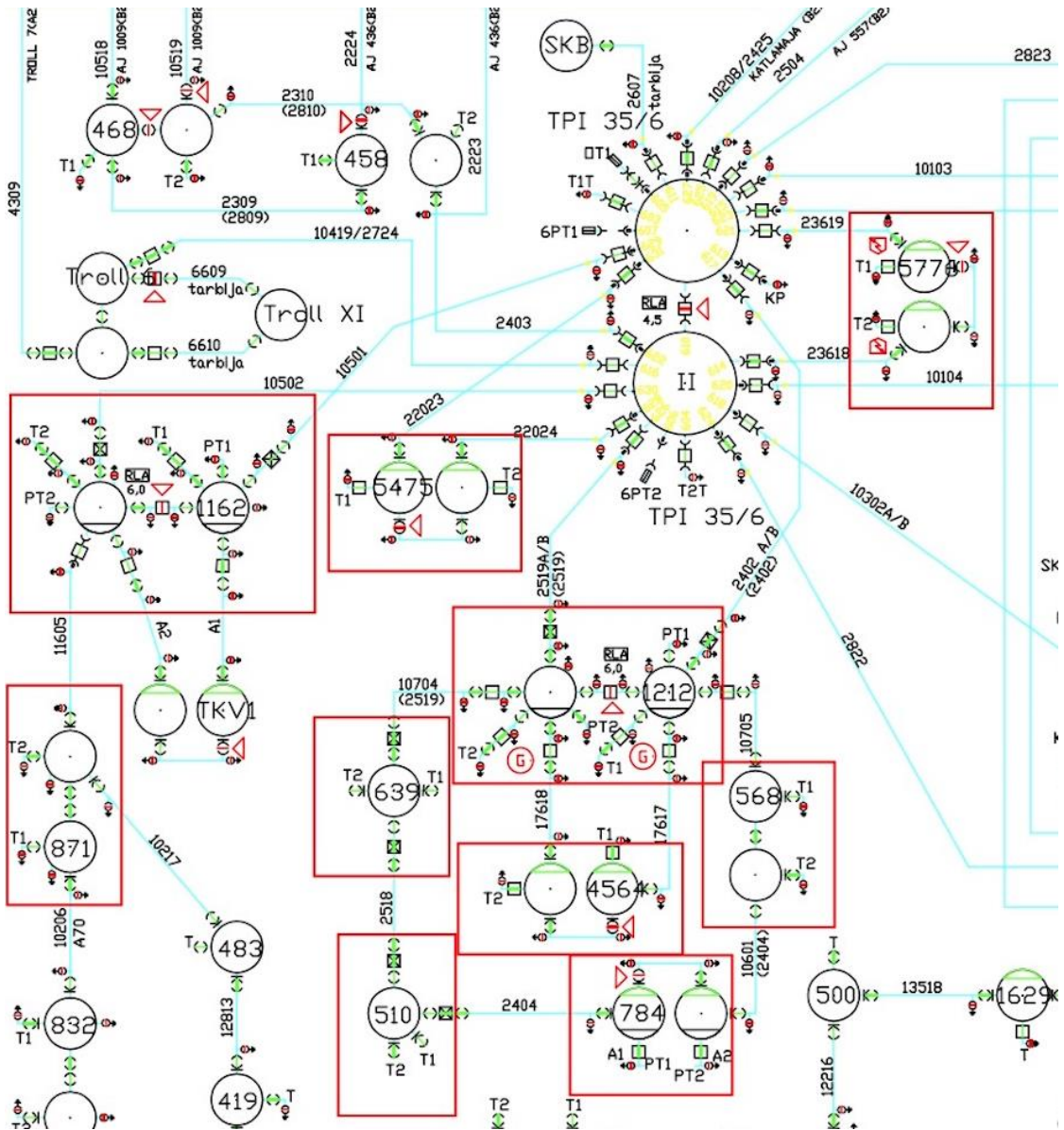
#### **3.1 TalTech-i elektrivõrgu lühikirjeldus**

TalTech ülikooli linnaku elektrivõrk on täies ulatuses kaabelvõrk. Linnakus on kümme 6/0,4 kV alajaama mis on ühendatud TPI 35/6 alajaamaga ja järgmiseks on Järve 110/35 kV alajaam. Lisas 2 on TalTech-i alajaamade täis skeem ja joonisel 3.1 on punastega märgitud 6/0.4 kV alajaamad, mis pakkuvad autorile huvi koormuste uurimiseks ja ISEAUTO laadijate paigaldamiseks.

Alajaama 6/0.4 kV lühikirjeldamiseks oli autori poolt valitud energeetikamaja alajaam numbriga 784. Alajamas on kaks 630 kVA trafot, primaarnimipingega 6300 V ja sekundaarnimipingega 410 V, trafod valmistati 2004 a.

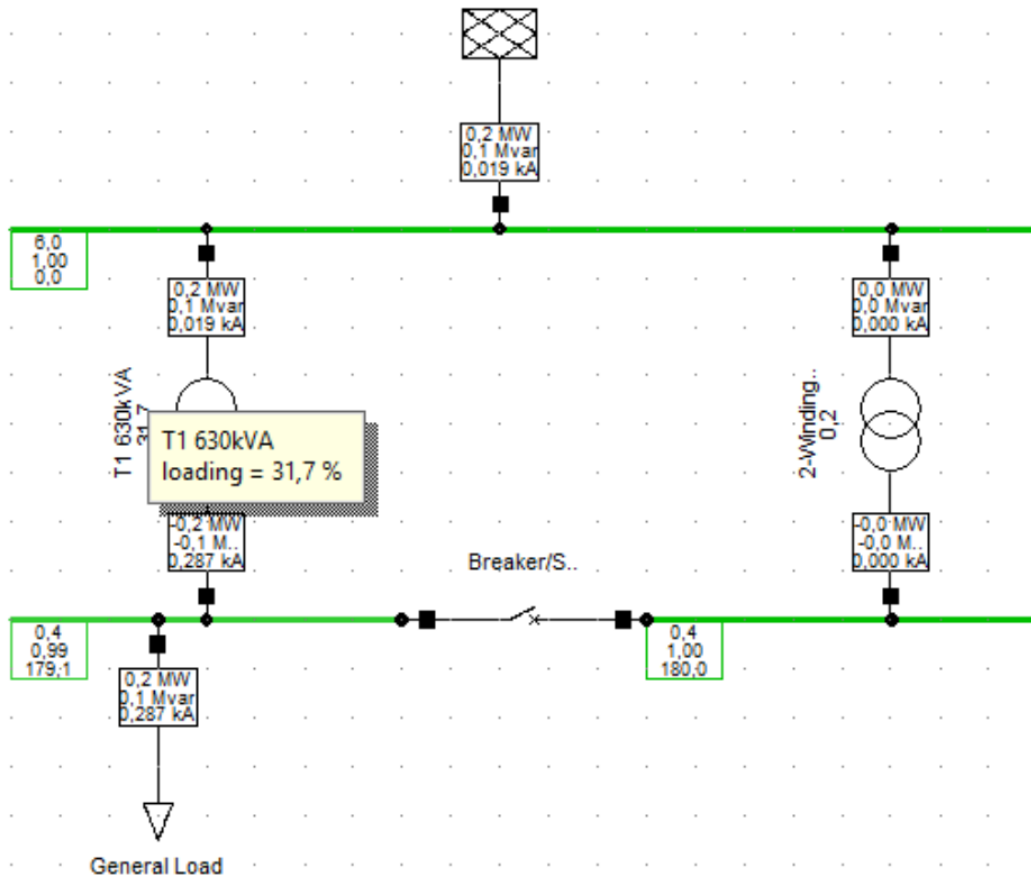
Lisas 3 on alajaama 784 ühendusskeem. Alajaama koormuste analüüsimiseks oli autori poolt valitud üks nädal aprilli kuus (21.04.14 – 27.04.14), täitsa tavaline nädal semestri sees. Kuna aprilli kuus juba valguspäeva pikkus kasvab võib arvestada ka seda et talvistel päevadel on koormus seotud ruumide valgustamisega suurem, kui kevadel, sügisel ja suvel. Selle uuringu raames see erinevus ei ole nii oluline.

Lisas 4 on toodud tabelis andmed iga trafo kohta päeva lõikes. On näha, et esimene trafo on peaaegu töötab ilma koormuseta ja sellel trafol on olemas võimsused, mida saab ISEAUTO laadimiseks kasutada. Teine trafo on ca 96 kWt aktiiv ja ca 32 kvart reaktiiv võimsusega koormatud. Selle trafoga on ühendatud energeetika majaõpperuumid, laborid ja seadmed. Maksimalne koormus selle nädala jooksul oli 180 kWt ja 79 kvart.



Joonis 3.1 TaTech-i alajaamade skeem ja võrgumodeli jaoks valitud alajaamad

Kõigepealt ISEAUTO laadimis potentsiaali uurimiseks oli vaja teada saada milline potentsiaal on sellel ajajaamal ja mitu elektriautod saab korraga laadima panna. Arvestades maksimaalse koormuse on tehtud alajaama mudel DlgSILENT programmis, koormuseks on pandud 96kW ja 79kvar seega tuli et sellel perioodi trafo maksimaalne koormus oli 31,7%. Joonisel 3.2 on lihtsustatud alajaama mudel DlgSILENT programmis kus oli autori poolt uuritud võimusevoog trafodes.

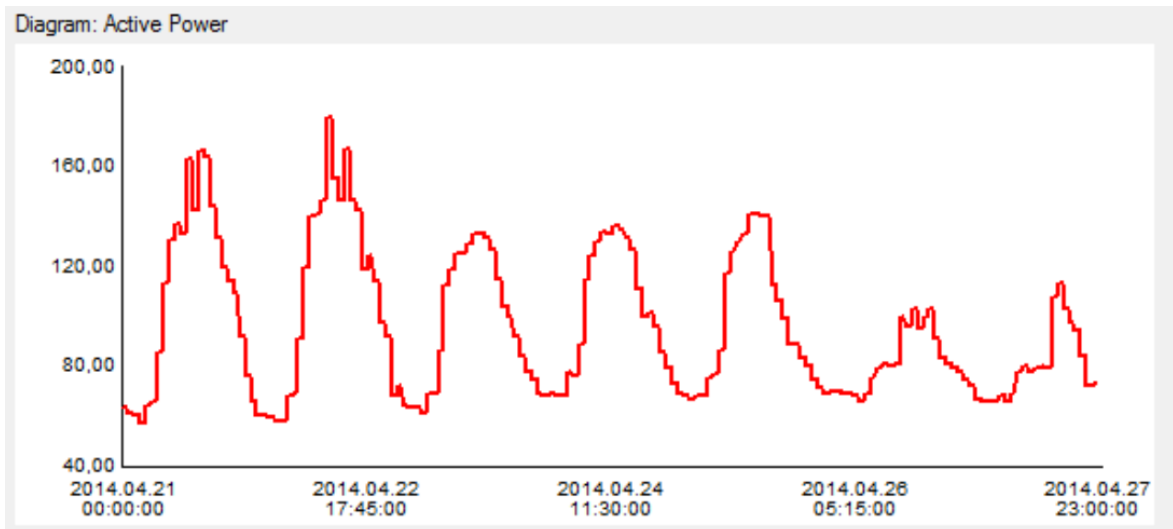


Joonis 3.2 Energeetikamaja lihtsustatud alajaama muudel programmis DlgSILENT trafode koormuste uurimiseks, maksimaalne koormus 31.7%

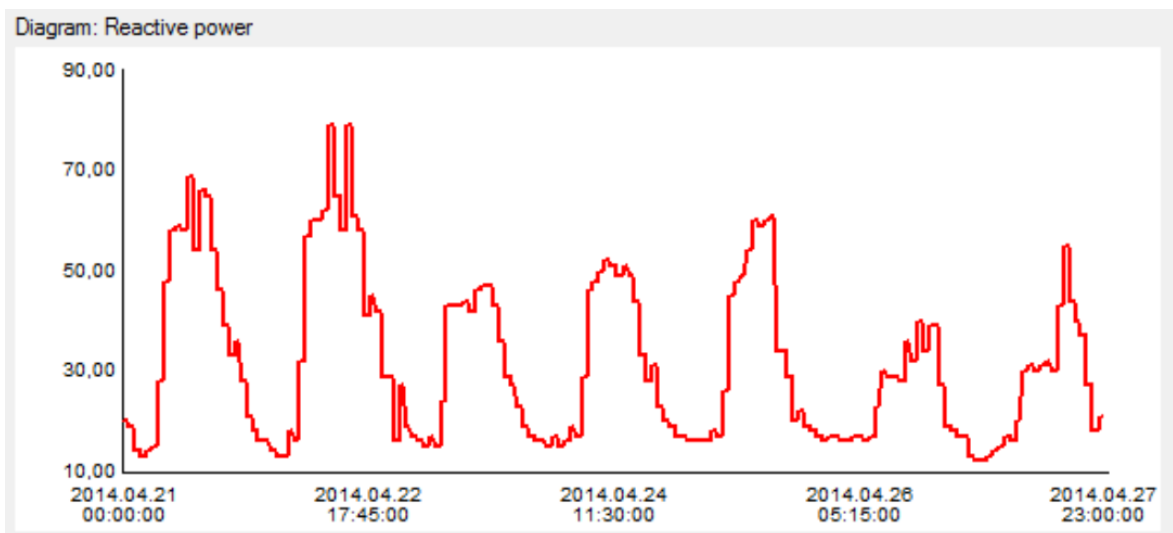
### 3.2 TalTech-i energeetikamaja koormused alajaamas

Selleks et valida optimaalne aeg elektriautode laadimiseks autori poolt oli uuritud koormused energeetikamaja trafodes ja selle kohta on koostatud lihtsustatud koormuste muudel DlgSILENT programmis. See muudel arvestab trafode tüübid, elektriliini kaablid, nii aktiiv kui reaktiiv koormused jooksul. Edaspidi siin saadud tulemused ja andmed autor kasutab ISEAUTO laadijate simuleerimiseks energeetikamaja alajaamas.

Järgmiseks uurimis etapiks oli idee teha kavaasi-dünaamilised koormuste uurimised alajas. Seega autor tahtis leida optimaalne aeg ISEAUTO-de laadimiseks arvestades muutused koormustes päeva ja nädala jooksul. Uurimiseks oli võetud andmed trafode koormuste kohta ajavahemikul 21.04.14 – 27.04.14. Tulemuseks tuli see, et kõige optimaalsem aeg on ikka öösel, lisaks on ka sel ajal tavaliselt elektri hind kõige madalam, joonis 3.3 näitab aktiiv võimsuste muutused ja joonis 3.4 reaktiiv võimsuste muutused ühe nädala jooksul.



Joonis 3.3 Aktiiv võimsus ühe nädala jooksul



Joonis 3.4 Reaktiiv võimsus ühe nädala jooksul

Energeetikamaja alajaamas on kaks samavõrdsed trafod ja kuna teise trafo koormus on alla 5% siis antud uuringu käigus ei mõju see oluliselt elektriautode laadimiseks. Seega autor arvestab neljandas pealtükis, et teise trafo võimsus võib täis mahus kasutada elektriautode laadimiseks ja see ei mõju temaga koos ühendatud koormustele.



## 4. EESTI ISEJUHTIVAUTO – ISEAUTO

ISEAUTO projekt sai alguse 2017 aastas juunikuus ja lõpptähtajaks oli 2018 sügis. Projektiga oli tehtud palju tööd ja esimese prototüübi näidati TTÜ 100. aastapäeval millal toimus ka esimene avalik esitlus ja proovisõit. Arendamine jätkub edasi ja lahendatakse ka teisi tehnilisi probleeme.

Selles peatükis autor vaatleb ISEAUTO projekti, räägib üldiselt projektist, põhiosadest ja kõigepealt aku ja laadimis süsteemist. Milline võiks olla ISEAUTO projekti tuleviku arendamine ja millised eesmärgid püstitatud projekti loojate poolt. Tähtsam osa on ka ISEAUTO-de kasutamine TalTech-i võrgus ja millised probleemid ja nüansid tuleb arvestada.

### 4.1 ISEAUTO projekti üldkirjeldus ja tuleviku areng

ISEAUTO aluseks on võetud Mitsubishi i-Miev elektriauto, mille aluses ehitati väike buss mis mahub kuni kuus reisijat. Sõiduki maksimaalne kiirus on 20 kilomeetrid tunnis, mis on ka piiratud tarkvara poolt, sest ISEAUTO on mõelnud sõitmiseks siseterritooriumil [35]. Sees puuduvad sellised tava auto juhtelemendid nagu rool, pedaalid ja käigukang, kuid reisijal on võimalik vajadusel salongis paiknevast häädapiduri nupust auto seisata.



Joonis 4.1 ISEAUTO isejuhtiv buss TalTech-i linnakul [8]

ISEAUTO isejuhtiva bussi põhieesmärgiks on luua isejuhtiv sõiduk, mis on võimeline autonoomselt sõitma ja läbima etteantud marsruudid. Joonisel 4.1 on pildistatud ISEAUTO mis tegi oma esimese ametliku autonoomse sõidu septembris 2018 aastal TalTech-i linnakul. Suveks 2019 valmistatakse teine isejuhtiv buss.

Oluliseks on ka sõiduki turvalisus nii reisijatele kui ka ümbritsevatele keskkonnale. Sõiduks peaks arvestama liikluskorraldusi, kasutades sõitmiseks selleks ettenähtud sõiduteid, jälgida teist kaasliiklejaid ja jalakäijaid. ISEAUTO võiks tulevikus olla üks liikluse osast suletud territooriumil nagu TalTech-i linnak või tööstuse territooriumil. Laimaks eesmärgiks on luua ISEAUTO-ga nutika infrastruktuuri, mis sisaldaks ka nutikaid liiklusmärke, targa laadimisjaamu ja teised nutika linna elemente. ISEAUTO isejuhtiv buss saab ka olla viimase miili lahendus [35].

Projekt leidis huvi ka TalTech-i koostöö partneritel. Nende hulgas on sellised ettevõtted nagu Silberauto AS mis tegeleb eesti turul elektriautodega ja pakub klientidele Mitsubishi i-MiEV elektriautod, mis on ka eesti kõige populaarsemad [36]. Ettevõtte kasutades oma kogemusi aitab keretöoga ja ka nõustab Mitsubishi i-MiEV elektriauto kohta. ABB ettevõtte oma tegevuses seotud mootoritega ja kontrollritega, mis ka aitab ellu viia ISEAUTO keerulised tehnilised lahendused. Berman Technologies AS, VTT, Delfti ülikool ja Tokyo ülikool on ka teevad selle projekti raames koos töö Taltech-iga ja jagavad isejuhtimise sõidukite valdkonnas oma kogemuse ja aitavad sõiduki arendamisel [35].

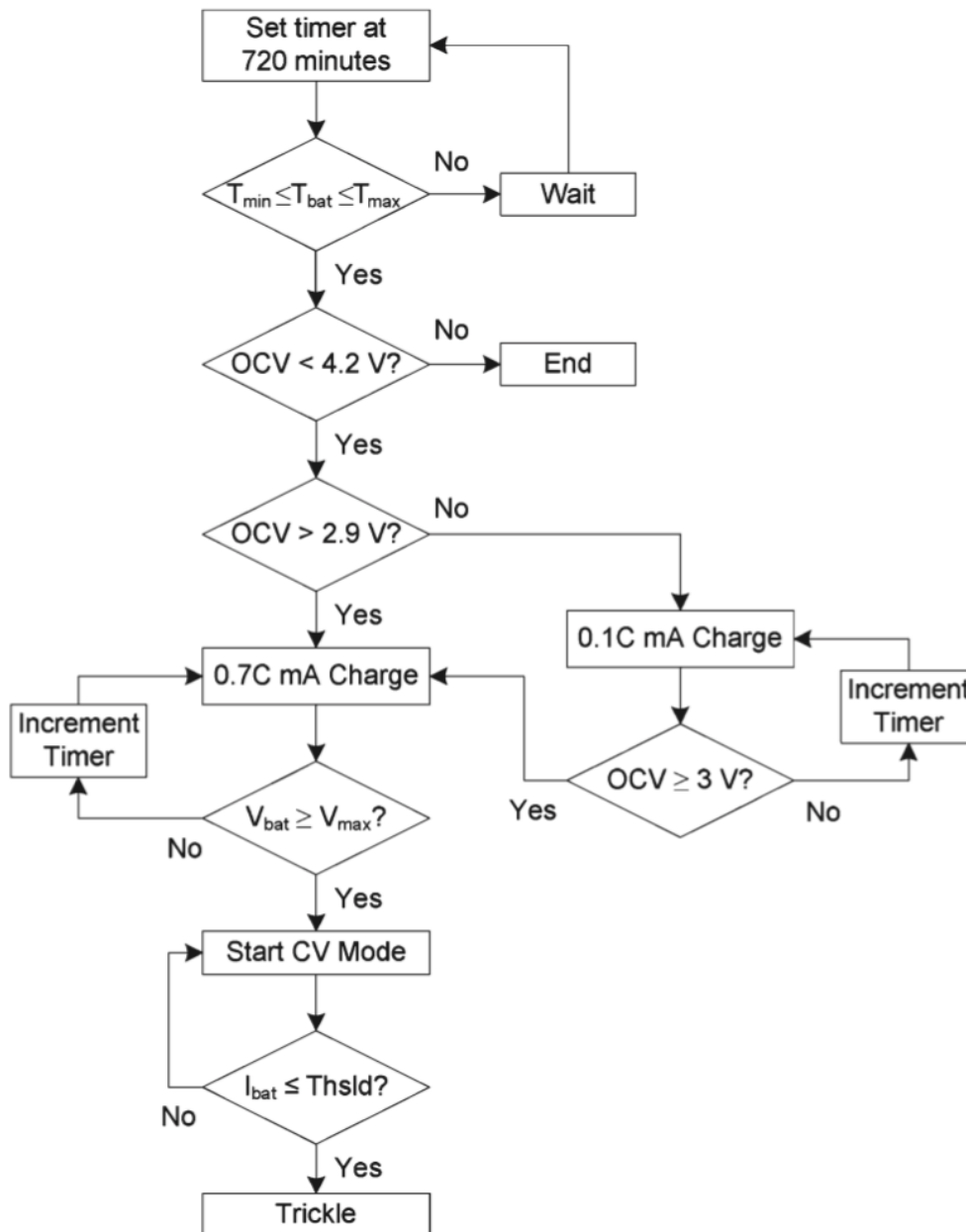
ISEAUTO projektiga on juba tehtud mitu arendamise etapi. Nende etappidega saab hinnata kui kaugele on arendus jõudnud tuleviku tegevusi planeerida. Selleks ajaks on edukalt lõppenud 4 etapi, mille käigus hinnati sarnased projektid maailmas, uuriti tehisintellekti ja isejuhtimise algoritme, kontrollrite töö ja testiti kõik lahendused Mitsubishi i-MiEV baasil ja tehti ka ametliku autonoomse sõidu.

Tuleviku areng on kõigepealt keskendub testimisele, algoritmide täiustamisele ja komponentide töö optimeerimisele. Lisaks on plaanis valmistada ka teised portotüübid.

## 4.2 ISEAUTO laadimis süsteemi kirjeldus

ISEAUTO-s kasutatakse Mitsubishi i-MiEV Li-ion (liitiumioon) 16kWh akupakk mis asub auto alumises osas. Li-ion akudel on väga nõudlikud laadimistingimused, mis nõuavad kontrollida temperatuuri ja laadimisvoolu, selleks et vältida üle kuumus ja üle laadimist. Li-ion aku laetakse konstantse pingega koos voolu piirajaga selleks et ei tekkiks temperatuuri tõusu laadimis protsessi

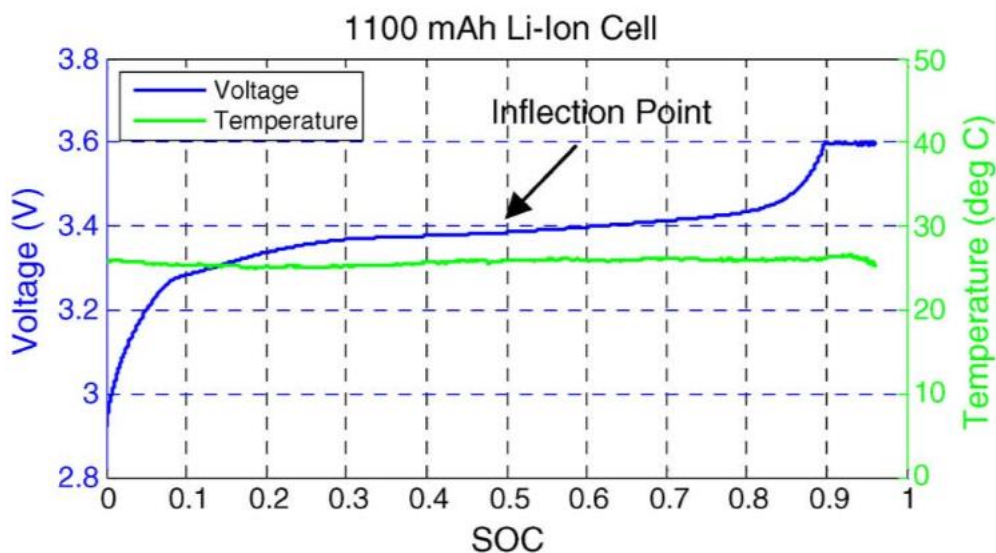
alguses. Veel üks tähtsam nõudmine li-ion akudele juures on see et laadijate kontrollid peaksid jälgida pinge iga li-ion elemendil, see tagab balansseeritud laadimine ja pinge tõusu igas aku elemendis. Tavaliselt see algoritm ja lisa kaitse ahelad on lisatud iga li-ion laadimis süsteemi tehase poolt [37].



Joonis 4.2 Li-ion aku laadimise algoritm [37]

Li-ion akude laadimise algoritm blokk-skeemiga on kujutatud joonisel 4.2. Selles algoritmis kogu aeg kontrollitakse aku temperatuuri näidud. Laadimine algab sellest et mõõdetakse aku peal pinge (OCV open circuit voltage) mis ei ole ühendatud koormusega. Kui mõõdetud pinge on vahemikus

2.9...4.2V siis laetakse aku 0.7C vooluga (0.7C tähendab 70% aku mahtuvusest, näiteks kui aku mahtuvus on 5000mAh siis laetakse aku vooluga  $0.7 \cdot 5000$  tuleb 3500 ehk 3.5A). See toimub nii kaua kui aku pinge jõuab 4.2V piirini või möödub määratud aeg. See on niinimetatud CV constant voltage (konstante pinge) laadimise protsess. Järgmisena läheb tööle CC constant current (konstantne vool) laadimise etapp ja kestab nii kaua kui määratud pinge langus künnis või määratud protsessi aeg ei ole ületatud [37]. Kui aku oli hästi maha laetud ja pinge on alla 2.9V siis laadija paneb elemendid laadima 0.1C vooluga nii kaua kui elemendid saavutavad vähemalt pinge 2.9V selleks et sisse lülitada kiirlaadimis etapp. Ohutuse pärast laadimise kontroller lülitab aku laadijast välja kui märkab et aku elementide temperatuuri erinevus on ületatud tehase poolt etteantud väärtusest. See võib tähendada et aku kasutamise tingimuses on rakendatud või on olemas mingid vigastused aku elementides [37]. Kuna li-ion aku on elektriautode põhi kütusealik siis tootjad panevad suur tähelepanu selle, et auto igapäevane kasutus oleks turvaline. Teistpidi vigased algoritmid ja probleemsed li-ion aku elemendid võivad põhjustada tulekahju ja vigastada inimesi.



Joonis 4.3 Ühe li-ion elemendi laadimise graafik [37]

Temperatuuri jälgimine kogu li-ion aku laadimise protsessi jooksul jääb väga olulisemaks igale elektriauto tootjale. Seega on ka seotud probleemid et ühtepidi kiirendada laadimis protsessi ja teistpidi hoida kogu aeg aku elementide temperatuur ühel niivool. Joonisel 4.3 on näidatud ühe li-ion aku elemendi laadimise ja temperatuuri kõverad. On hästi näha et temperatuuri tase on laadimis aja jooksul stabiilne ja suuri võnkumisi ei esine. Kiirlaadijate eesmärk suurevooluga jõudma laadida aku määratud tasemini, nii et näitkeks kolmandiku aku mahtuvusest jõudma 80% poole tunniga, see kindlasti toob ka probleemi temperatuuri tõusuga.

### **4.3 ISEAUTO-de kasutame TalTech-i võrgus**

Käesolevas punktis on toodud ISEAUTO-de modelleerimise tulemused kasutades li-ion akude laadimiskõverad ja voolukõverad laadimise jooksul. Selleks on võetud i-MiEV elektriauto laadijate andmed ja parameetrid..

Autori poolt oli püstitatud ülesanne uurida kuidas ja mis mahus võib kasutada ISEAUTO-de laadijad TalTech-i elektrivõrgus ning uurida millised võimalused on selleks olemas. Kolmandas peatükis oli vaadeldud TalTech-i alajaamad ja ühe näidiseks oli autori poolt valitud energeetikamaja alajaam. Selles alajaam on kaks trafod, üks nendest on pidevalt koormatud vastavalt koormuste graafikute, mis oli ka toodud kolmandas peatükis, teine trafo on vaba. Nüüd on olemas kõik andmed selleks, et uurida mitu elektriauto võib korraga laadida selles alajaamas. Milline aeg on selleks kõige parem, arvestades trafo koormused ööpäeva lõikes.

### **4.4 ISEAUTO ja TalTech-i elektrivõrgu koostöös**

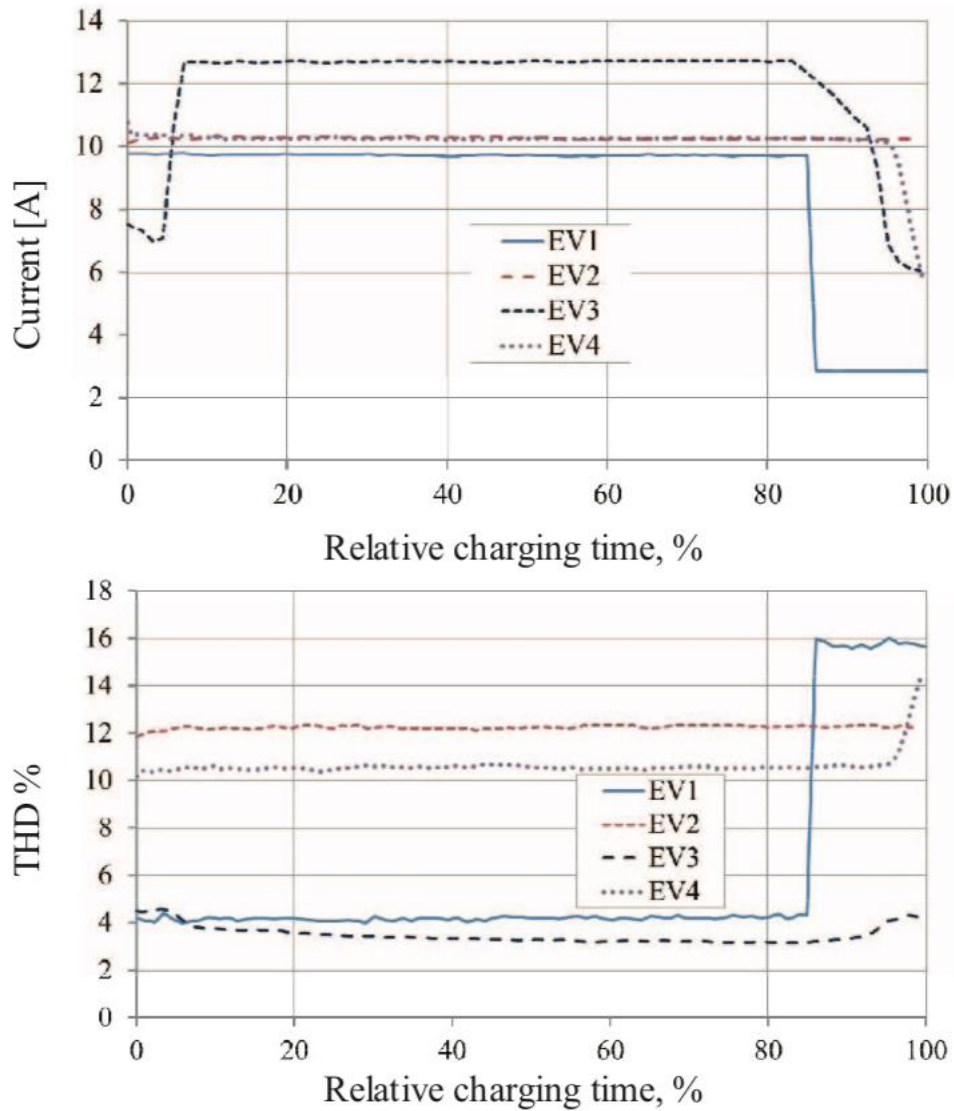
ISEAUTO laadimiseks on valitud aeglane laadija (level 2, ühefaasiline 240V, 3.7kW max). Uuringud näitavad [38] et mõlemad laadimis standardid nii kiired kui ka aeglased tekivad elektrivõrgus kõrgemad harmoonikad. Ühe keskmise aeglaselaadija pingele kolmandat järku harmoonikate tase on vahemikus 0.07% - 0.42% kasutatud pingest, neljandat on 0.6% kuni 1.31% ja seitsmendat 0.05% kuni 0.31%. Keskmine summaarne THD on vahemikus 0.75% kuni 1.92% [38].

Kindlasti võib öelda, et kiirema laadija harmoonikate tase on suurem, kuid autori uuringus neid ei arvesta. Samuti muutub pilt kui on mitu laadijat korraga ühendatud elektrivõrguga, see toob harmoonikate tase suurendamiseks.

### **4.5 ISEAUTO-de kasutuse modelleerimine TalTech-i elektrivõrgus tarkvaraga DlgSILENT**

Arvestades eelmises peatükis saanud andmeid, li-ion aku laadimis graafikut ja uuringu [38] alusel leitud harmoonikate tasemed võib programmis DlgSILENT simuleerida ISEAUTO laadimine TalTech-i võrgus. Uurimis objektiks on võetud energeetikamaja alajaam ja aeglane ühefaasiline 10A laadija. Laadimisgraafik ja keskmised moonutused on esitatud joonisel 4.4. Andmed on võetud uuringutest [53, 54] mille käigus autorid vaatlesid erinevad autod ja nende mõjud elektrivõrgule. ISEAUTO

laadimis süsteemile on kõige lähedane elektriauto EV4 parameetrite järgi, akuga 16 kWh ja THD keskmiselt 3.4%. Edaspidi need parameetrid autor kasutas DlgSILENT programmis simulatsiooni tegemiseks.



Joonis 4.4 EV laadimis ja voolu harmoonikate kõverad, ISEAUTO lähedane variant on EV4 [39]

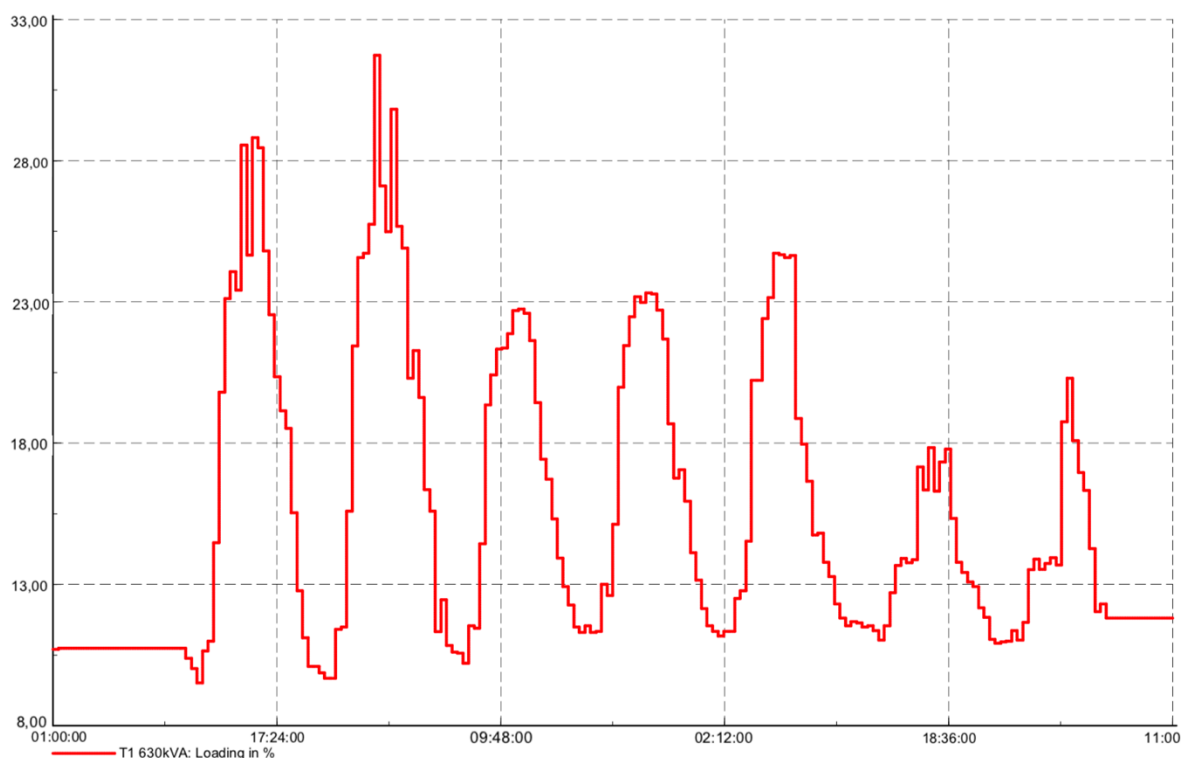
Tavaliselt elektriautod kasutatakse tööpäeva sees ja kuna ISEAUTO on mõelnud pigem siseterritooriumil ja see on „last mile“ elektriauto siis autor käitub sellest et elektriautod pannakse laadima päeva teises pooles ja hakatakse kasutada päeva alguses, kas juba vara hommikul või päeva jooksul. Kui vaadata kolmandas peatükis energeetikamaja aktiiv- ja reaktiiv koormused, siis kõige optimaalsem aeg on kella 22.00 kella 6.00, sel ajal on kõige madalam võimsuste tarbimine. Tootja andmetel laadimine seinalaadijaga (1x10A) võtab keskmiselt 7.5 tundi, kui aku on täitsa tühi.

Joonis 4.5 on arvutuslik laadimis periood ja laadimis parameetrid arvestades aeglaselaadija laadimise võimalused, vastavalt graafikule joonisel 4.4.

Kellaeg	Tund	A	V	W	var
22.00	1	9	230	2070	41,4
23.00	2	9,5	230	2185	43,7
00.00	3	9,7	230	2231	44,62
01.00	4	9,7	230	2231	44,62
02.00	5	9,7	230	2231	44,62
03.00	6	9,7	230	2231	44,62
04.00	7	9	230	2070	41,4
05.00	8	5,5	230	1265	25,3
			Kokku	<b>16514</b>	330,28

Joonis 4.5 ISEAUTO laadimis parameetrid

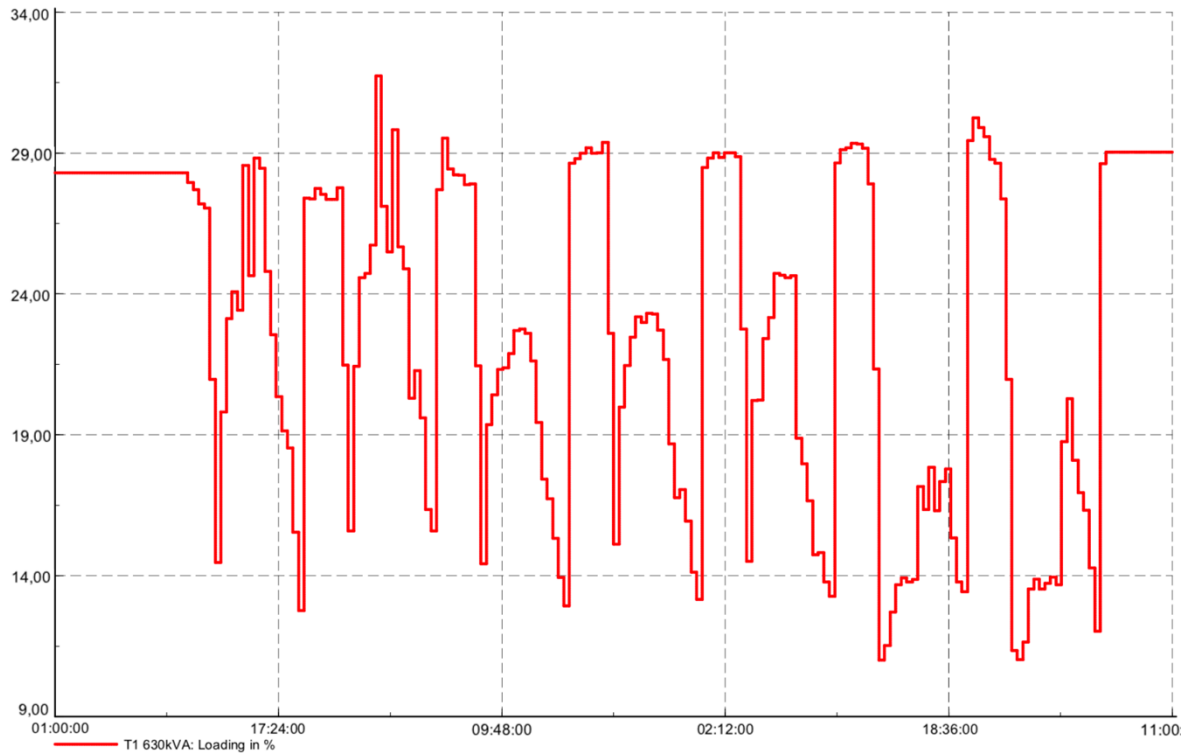
Tabelist paistab et ligikaudne võimsust vastab aku võimusele (16kWh) ja isegi natuke suurem. See on seotus laadija ja laadimis moodulite kasuteguritega, mis on 90-95% juures, aktiiv- ja reaktiiv võimuste suhe on ca 0.98% (power factor). Ühe auto ühendamine ja pidev laadimine energeetikamaja alajaama ei too kaasa mingi probleemi ega lisa koormused, joonisel 4.6 on trafo koormus graafik koos ühe ISEAUTO ühendatud iga öö laadimiseks.



Joonis 4.6 Energeetikamaja trafo koormuse graafik nädala jooksul, kõige suurem pikk on 31%

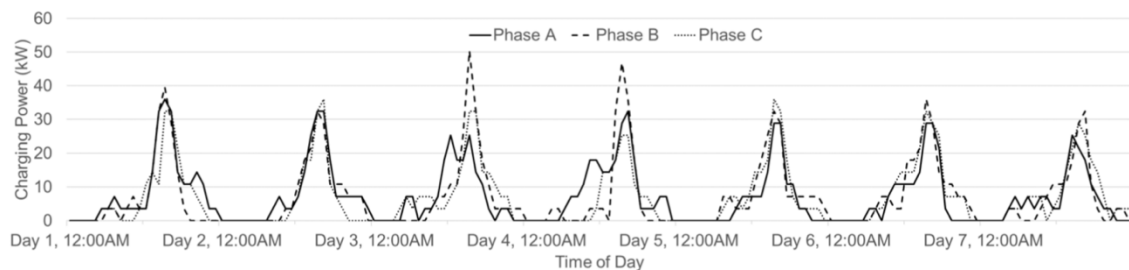


Kui sama trafoga ühendada 50 ISEAUTO-d siis koormuse graafik läheb natuke ühtlaseks, joonis 4.7. Kui laadimine hakkab toimima ainult öösel ja teatud aja jooksul siis koormuse poolt ei mõju see oluliselt trafotele. 50 aeglase laadijate juure sees teeb ca 112 kW-t ja ca 3 kvar-t koormust trafotele, see niivõrd lähedane trafo päevasele koormusele.



Joonis 4.6 Energeetika maja trafo koormuse graafik, trafoga on ühendatud 50 aeglast laadijat.

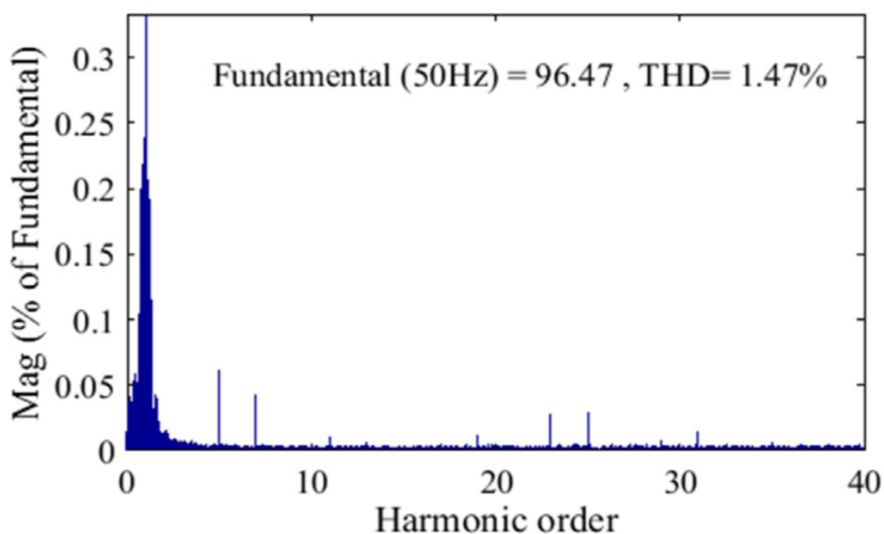
Modelleerimises autor lähtub sellest et kõik ISEAUTO-de laadijad on võrdsest jaotatud erinevate faaside vahel (A,B,C). Võib küll tekkida sellist olukorda, kui näiteks üks elektrilauto lõpeb oma aku laadimist kiiremini, kui teised. Seega tekib mittersümmeetria faasides, mis toob ka ebaproportsionaalsus trafos ja faaside nihe. Autor selle töö raames ei vaatle seda olukorda kuid kasutab teise uuringu [40] tulemusel, joonisel 4.7 on erinevused faasides A, B ja C.



Joonis 4.7 Erinevused faasides kui korraga pandi 57 elektriautod laadima [40]



Võib arvata, et madalapingega võrgus 0.4 kV elektriautod avaldavad märkimisväärsed suured pingemoonutused isegi siis kui elektriautod on võrdselt jaotatud faaside vahel. Uuringud [25] näitavad et parimad laadijad on võimelised enam kui 50% võimsuse juures voolukuju moonutuse väärtuse hoidma alla 5%. Joonises 4.8 on harmoonikate jaotamine, tulemused võetud uuringust [42], graafikust on näha, et ühe auto laadimise edastavad moonutused elektrivõrku on ca 1.5%. Autori poolt tehtud uuringud ISEAUTO kohta ja teised uuringud [41] näitavad samad tulemused. DlgSILENT programmis tehtud simulatsioonid näitasid ka liigikaudne THD 2.5% juures ühe auto puhul ja korraga 50 ISEAUTO ühendamisega oli THD kasvas 5%-ni.



Joonis 4.8 Harmoonikad keskmise väärtusega 1.47% [42]

Autori poolt tehtud modelleerimised ja simulatsioonid, samuti ka teised uuringud [20, 54, 55] näitavad et ISEAUTO-de võrdsel jaotamisel alajaamade vahel ei too probleeme kuni ligikaudu 100 aeglast elektriautode laadijat korraga kasutamist Taltech-i elektrivõrgus. Analüüsidest kõike alajaamade seadmed ja eriti trafosi, autor leiab et TalTech-i võrgus on piisavalt reservi ISEAUTO-de sisseterritooriumil massiliselt kasutamiseks. Taltech-i linnakus on 10 alajaama ja kui jagada nende vahel 100 ISEAUTO-de laadijat siis igaühel tuleb 10 laadijat mis on tegelikult ei ole märgatav lisa koormus alajaamas olevale trafole.

Autor pani oma modelleerimise mudelis suur tähelepanu energeetikamaja alajaamale, seega said ka tulemuse et pinge ja voolu moonutused, koormused trafos ja liinis jäävad lubatud piirides. Majandusliku kasuks tuleb ISEAUTO-de laadimine öösel ja kõige optimaalsem aeg selleks on autori arvamuse järgi ja uuritud andmete järgi kella 22.00 kella 6.00. Selleks tuleb kasutada näiteks taimeriga programmeeritav elektripesa, mis ette antud ajaks paneb laadijat töösse.

## 4.6 Elektriautode mõju ülekandevõrgule

Põhi uurimis objektideks autori poolt olid valitud TalTech-i alajaamad. Ülekandevõrk ei pukkunud nii suurt huvi selle töö raames. Üldpildi vaatamiseks autor kasutas juba olemasolevad uuringud. Näiteks, uuringus [23] oli toodud modelleerimise tulemused kasutades elektriauto modelleerimiseks reaalseid voolukõveraaid ja uuriti kuidas elektriautod võivad mõjutada TalTech-iga ühendatud ülekandevõrgule. Selle uuringu tulemused näitavad, et ainuüksi elektriautode koormus suuri pingemoonutusi ülekandevõrgus kaasa ei too. Pingemoonutuse väärtus THD jäi kõikides uuritud vaadeldud variantides nii 35 kV kui ka 110 kV elektrivõrgus alla 0,01%. Maksimaalseks moonutuse väärtuseks oli 0,008%. Selle uuringu autorid panevad tähele et elektriautod olid ainsad reaalse voolukujuga tarbijad, teised tarbijad olid esitatud puhast siinuselist kuju tarbivad aktiivvõimsused. Real olukorras alajaamas lattidel esinevate moonutuste väärtuste erinevus on tingitud trafode, liinide ja lattide omavahelistest ühendustest ning talitlustest. Selle uuringu [23] tulemused olid kõige lähedased mis sööbisid autorile üld pildi koostamiseks, samuti ka oli üle vaadatud erinevad artiklid mis suures osas näitasid ka samad tulemused, seega võib öelda et olulist 50 ISEAUTO-de ühendamisega TalTech-i võrguga ei too mõju ülekandevõrgule.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli uurida kuidas ISEAUTO laadimis süsteemid võivad mõjutada TalTech-i elektrivõrgule. Millised võivad olla mõjud elektrisüsteemile ja kuidas nendest võib vabaneda või nende mõju teha väiksemaks. Töö käigus oli uuritud millised elektriautode laadimise lahendused on nii maailmas kui ka Eestis olemas, millised mõjud nad kaastoovad võrgule kui laadime elektriautosid. Põhi uurimis objektiks oli ISEAUTO isejuhtiv buss, mis on TalTech-i uus projekt Mitsubishi i-Miev-i baasil.

Töö esimene osa annab lühike ülevaade olemas olevatele elektriautodele, nende omadusele ja põhi parameetritele. Autor annab ülevaade olemasolevatest elektriautode tüüpidest ja tehnoloogiatest mida nad kasutavad. Nendest BEV, PEV ja PHEV elektriautode tüübid on kõige levinud maailmas. Suur osa peatükist on pühendatud elektriautode laadijatele ja nende pistikutele, millised erinevused on aeglasel ja kiirlaadijal. Räägitakse elektriautode laadimise moodusest ja lisaks autor toob välja ka alternatiiv meetodid elektriautode laadimiseks. Need meetodid on teadlaste ja suurte ettevõtjate tuleviku projektid mis võivad parandada olukorra transpordisektoris paremaks ja mugavamaks lõppkasutajale, selles suunas tehakse juba tänapäeval uuringuid. Nende kohta autor toob ka lühike kokkuvõtte.

Teises peatükis autor räägib mõjudest mis toovad mittesümmeetrilised seadmed elektrivõrku. Tänapäeval elektriautode hulk kasvab iga aastaga seega koormatakse rohkem ülekande- ja jaotusvõrke. Autor püüab selles peatükis välja tuua kõige olulisemad mõjud nii elektrivõrgule kui ka elektrivõrgus olevatele seadmetele, nagu trafo ja elektriliin. Vaadeldakse pingelang, pingete asümmeetria, moonutused ja kõrgemad harmoonikad. Autor räägib millised moonutused on lubatud standartide järgi ja toob välja ka uuringute tulemused, mis näitavad millised mõjud võivad tuua elektriautode aeglasel- ja kiirlaadijad kodumajapidamisele. Samuti autor on tutvunud viimaste uuringute tulemustega ja räägib sellest, kuidas võiks need mõjud väiksemaks teha ja millised on võimalikud variandid probleemide lahendamiseks.

Kolmas peatükis autor räägib TalTech-i elektrivõrgust. Eesmärgiks oli teha väike uurimistöö ja tutvuda TalTech-i elektrisüsteemiga. Selleks oli vaja tutvuda teaduri Victor Astapovi poolt saanud 2014 a. andmed alajaamade ja trafode kohta, lisaks oli eesmärgiks uurida millised koormused on praegu alajaamades. Selles peatükis on antud tulemused Energeetikamaja alajaama kohta mis on saanud DigSILEND programmiga. Kõik püstitatud praktilised ülesanded oli täidetud ja need tulemused on selles peatükis kirjeldatud. Suures osas on need koormuste kavaasi-dünaamilised simuleerimised valitud alajaamas.

Neljandas osas on ülevaade ISEAUTO projektist ja ISEAUTO-de laadijate mõjust ülekande- ja madalavoolu võrgule. Autor räägib täpsemalt ISEAUTO laadimis süsteemist, toob välja algoritmid kuidas li-ion akude laadimine käib ja millised on kõige olulisemad parameetrid mida tuleb jälgida. Samas peatükis autor räägib oma uuringu tulemustest mis on saadud kasutades DlgSILENT arvutiprogrammi ja uurib asjalikul võimsused TalTech-i energeetikamaja alajaamas. Samuti suur osa on pühendatud selle, ei kuidas võib 50 ISEAUTO-d mõjutada TalTech-i elektrivõrgule, seega autor leiab et mõju ei ole märgatav kui mõislikult jaotada koormused alajaamade vahel. Autor räägib ka teistest uuringutest ja toob välja need tulemused, mis üldiselt näitavad saamad numbrid mis oli autori poolt saadud, kuid teiseses tingimustes. Seega võib arvata et püstitatud ülesanded on autori poolt täidetud ja tehtud uuringu käigus on vaadeldud suures osas mõjud jaotusvõrgule kui ka üldiselt räägitud mõjudest ülekandevõrgule.

Lõputöö käigus autori poolt oli lugenud väga palju erinevaid teadusartikleid. Kõige raskem osa oli tutvuda DlgSILENT tarkvaraga ja aru saada kuidas kõik protsessid seal toimuvad, mis lubas ka simuleerida kõik vajalikud elektrivõrgu parameetrid. Autor arvad et need teadmised lähevad kasuks tulevikus magistriõppes.

Kokkuvõttes võib öelda et autori ja lõputöö juhendaja poolt püstitatud eesmärgid sai täidetud. Kuid valitud teema valdkonnas on palju huvitavaid suundi ja võimaldab ka edasi uuringuid teha. Saadud tulemused ja kokkuvõtteid võib kasutada selleks, et suurendada ISEAUTO-de hulk TalTech-i linnakus või kuskil müüjal siseterritoriumil arvestades koormused ja moonutused alajaamades.

## SUMMARY

The purpose of this bachelor thesis was to study how ISEAUTO charging systems can affect TalTech's electricity network. What are the effects on the electrical system and how to get rid of them or make their impact smaller. In the course of the work, what electric car loading solutions are available in the world and in Estonia, what impact they have on the network when we load electric cars. The main subject of the research was the ISEAUTO self-guiding bus, which is TalTech's new project based on Mitsubishi i-Miev.

The first part of the work gives a brief overview of the existing electric cars, their features and basic parameters. The author gives an overview of the existing types of electric cars and the technologies they use. Of these, the types of electric cars BEV, PEV and PHEV are the most common in the world. Much of the chapter is dedicated to electric car chargers and their connectors, which are the differences between a slow and a fast charger. The mode of charging electric cars is also discussed, and the author also outlines alternative methods for charging electric cars. These methods are projects of the future of scientists and large companies that can improve the situation in the transport sector for the better and more comfortable for the end user, studies are already being conducted in this direction. The author also gives a brief summary of them.

In the second chapter, the author talks about the effects that bring non-symmetric devices to the power grid. Nowadays, the number of electric cars is increasing every year, so more transmission and distribution networks are burdened. In this chapter, the author attempts to highlight the most important effects on the power grid as well as on electrical equipment such as transformer and power line. Tension drop, asymmetry of tensions, distortions and higher harmonics are observed. The author talks about what distortions are allowed by standards and also highlights the results of studies that show what effects slow-down and fast chargers for electric cars can have on households. The author is also familiar with the results of recent research and discusses how these impacts could be reduced and what are the possible options for solving problems.

In the third chapter, the author talks about TalTech's electricity network. The goal was to do a little research and get to know TalTech's electrical system. It was necessary to get acquainted with the research by Victor Astapov in 2014. data on substations and transformers, in addition, the objective was to investigate the current load at substations. This chapter provides results for the Energy House Substation obtained with the DIgSILENT program. All the practical tasks set forth were fulfilled and these results are described in this section. To a large extent, these load-dynamic and dynamic simulations are selected at the selected substation.

The fourth part gives an overview of the ISEAUTO project and the impact of ISEAUTO chargers on the transmission and low-flow network. The author speaks more precisely about the ISEAUTO charging system, outlines the algorithms how the li-ion batteries are charged and what are the most important parameters to be monitored. In the same chapter, the author talks about the results of his research using the DIgSILENT computer program and examines the actual capacities at the TalTech powerhouse substation. A large part is also devoted to how 50 ISEAUTOs can affect TalTech's electricity network, so the author finds that the effect is not noticeable as a reasonable distribution of loads between substations. The author also talks about other studies and outlines the results that generally show the numbers that were received by the author but in secondary conditions. Thus, it can be assumed that the tasks performed are fulfilled by the author and that the impact of the survey on the distribution network as well as on the overall impact on the transmission network has been examined.

A lot of different scientific articles were read by the author during the graduation thesis. The most difficult part was to get to know the DIgSILENT software and understand how all the processes take place there, which also allowed to simulate all the necessary network parameters. The author thinks that this knowledge will benefit the future Master's program.

In conclusion, the objectives set by the author and the supervisor of the thesis were fulfilled. However, there are many interesting directions in the area of the chosen topic and it also allows further research. The results and summaries obtained can be used to increase the number of ISEAUTOs in a TalTech campus or somewhere on the inside territory of a vendor considering loads and distortions in substations.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Raul Potisepp „Miks sul veel elektriautot pole?“, 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.aripaev.ee/arvamusd/2018/08/23/raul-potisepp-miks-sul-veel-elektriautot-pole>. [Kasutatud 20. 03. 2019].
- [2] “The e-mobility revolution: impact of electric vehicles on the GB power system and emerging utility business models“, 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.auroraer.com/insight/e-mobility-revolution-impact-of-electric-vehicles-on-the-gb-power-system>. [Kasutatud 20. 03. 2019].
- [3] Elektriautod. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.elektriautod.ee>. [Kasutatud 20. 03. 2019].
- [4] Kyle Field „Hydrogen Fuel Cell & Battery Electric Vehicles — Technology Rundown“, 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://cleantechnica.com/2018/08/11/hydrogen-fuel-cell-battery-electric-vehicles-technology-rundown>. [Kasutatud 20. 03. 2019].
- [5] Tesla autotootja. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.tesla.com>. [Kasutatud 20. 03. 2019].
- [6] Tehnikamaailm, ajakiri, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://tehnikamaailm.ee/mitsubishi-i-miev>. [Kasutatud 20. 03. 2019].
- [7] Mitsubishi autotootja. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.mitsubishi-motors.com>. [Kasutatud 22. 03. 2019].
- [8] ISEAUTO koduleht. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://iseauto.ttu.ee/en/technical>. [Kasutatud 22. 03. 2019].
- [9] Kiirlaadimise tutvustus. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://elmo.ee/kiirlaadimine/> [Kasutatud 24. 03. 2019].
- [10] Lõugas, H. „Eestis oli maailma esimene üleriigiline laadimisvõrk, miks see nüüd hädasti uuendamist vajab?“, 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://auto.geenius.ee/rubriik/uudis/eestis-oli-maailma-esimene-uleriigiline-laadimisvork-miks-see-nuud-hadasti-uuendamist-vajab>. [Kasutatud 25. 03. 2019].
- [11] David Herron, „EV DC Fast Charging standards – CHAdeMO, CCS, SAE Combo, Tesla Supercharger, etc“, 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://greentransportation.info/ev->

- charging/range-confidence/chap8-tech/ev-dc-fast-charging-standards-chademo-ccs-sae-combo-tesla-supercharger-etc.html. [Kasutatud 25. 03. 2019].
- [12] „Areas of Electromobility – Power Grids, Charging Stations, and Electric Vehicles“, 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.dspace.com> [Kasutatud 25. 03. 2019].
- [13] McDonald, Z. A. „Simple Guide To DC Fast Charging“, 2018 [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.zap-map.com/charge-points/connectors-speeds/>. [Kasutatud 25. 03. 2019].
- [14] Herron, D. (2017). Range Confidence: Charge Fast, Drive Far, with your Electric Car. 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://greentransportation.info/ev-charging/range-confidence/chap8-tech/ac-fast-charging.html>. [Kasutatud 25. 03. 2019].
- [15] Ylle Tampere (2019), „Elektriautoga bensiniijaama: Circle K avab peagi kaks esimest CCS superlaadijat“, 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.accelerista.com/soiduauto/elektriauto/circle-k-kiirlaadijad/>. [Kasutatud 25. 03. 2019].
- [16] Clement-Nyns K, Haesen E, Driesen J. „The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid.“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779610002063>. [Kasutatud 25. 03. 2019].
- [17] Juan Martínez-Laoa, Francisco G. Montoyaa, Maria G. Montoyac, Francisco Manzano-Agugliaroa „Electric vehicles in Spain: An overview of charging systems“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116310152> [Kasutatud 25. 03. 2019].
- [18] Akhtar F, Rehmani MH. „Energy replenishment using renewable and traditional energy resources for sustainable wireless sensor networks: a review. Renew Sustain Energy“ [Võrgumaterjal]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115001094>. [Kasutatud 25. 03. 2019].
- [19] Jiang W, Xu S, Li N. „Contactless power charger for light electric vehicles featuring active load matching.“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.scopus.com/inward/>








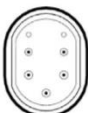





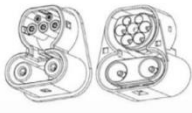

- record.url?eid=2-s2.0-84955449927& partnerID=40 & md5=a0200fdb8aed73ec  
18542f767a2ce580. [Kasutatud 25. 03. 2019].
- [20] Birrell S, Wilson D, Yang C, Dhadyalla G, Jennings P. How driver behaviour and parking alignment affects inductive charging systems for electric vehicles. [Võrgumaterial].  
Saadaval: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84940462984&partnerID=40& md5=dacefe6e183b24e068db02d0354d82f5> [Kasutatud 30. 03. 2019].
- [21] ELMO - EESTI ELEKTROMOBILSUSE PROGRAMM, 2019. [Võrgumaterial]. Saadaval: <http://elmo.ee/elmo/> [Kasutatud 25. 03. 2019].
- [22] L. Kütt, E. Saarijärvi, M. Lehtonen, H. Mölder ja J. Niitsoo, „A Review of the Effects of Electric Vehicle Charging on Distribution Network Operation and Power Quality,“ Proceedings of the 8th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT-2013, Kaunas, Lithuania, 2013. [Kasutatud 25. 03. 2019].
- [23] I. Palu, J. J. Šuvalova, T. Sarnet, T. Kangro, J. Niitsoo, T. Rähmonen, E. Lepp, M. Löper „Elektertransport ja selle mõju elektrisüsteemi talitlusele“ Tallinn, 2014. [Kasutatud 25. 03. 2019].
- [24] T. J., A. Götz ja W. Schufft, „Electric vehicles and their effects in low-voltage grids,“ International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ), 2011. [Kasutatud 25. 03. 2019].
- [25] A. Broy ja C. Sourkounis, „Influence of charging electric vehicles and on the quality of the distribution grids,“ Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU). [Võrgumaterial]. Saadaval: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6128804> [Kasutatud 25. 03. 2019].
- [26] K. Clement-Nyns, E. Haesen ja J. Driesen, „The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid,“ IEEE Transactions on Power Systems, kd. 25, nr 1, pp. 371 – 380. [Võrgumaterial]. Saadaval: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5356176>. [Kasutatud 25. 03. 2019].

- [27] „Elektrikvaliteet“, 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://energiatalgud.ee/>. [Kasutatud 25. 03. 2019].
- [28] T.Vinnal „Toitepinge kvaliteet Eesti 0,4 kV madalpingevõrkudes ja tarbijapaigaldiste liitumispunktides“, Tallinn 2013. [Kasutatud 10. 04. 2019].
- [29] F. Shahnia, A. Ghosh, G. Ledwich ja F. Zare, „Voltage Unbalance Sensitivity Analysis of Plug-in Electric Vehicles in Distribution Networks“, Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2011. [Kasutatud 10. 04. 2019].
- [30] „Mis on harmooniline moonutus?“, 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://ee.microphonesupplier.com/info/what-is-harmonic-distortion-29022877.html>. [Kasutatud 10. 04. 2019].
- [31] F. Musavi, M. Edington, W. Eberle ja W. Dunford, „Evaluation and Efficiency Comparison of Front End AC-DC Plug-in Hybrid Charger Topologies“, 2012. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6056591>. [Kasutatud 10. 04. 2019].
- [32] L. Kütt, E. Saarijärvi, M. Lehtonen, H. Mölder ja J. Niitsoo, „Current Harmonics of EV Chargers and Effects of Diversity to Charging Load Current Distortions in Distribution Networks“, Proceedings of 2013 International Conference on Connected Vehicles & Expo, Las Vegas, USA, 2013. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6799884> [Kasutatud 10. 04. 2019].
- [33] R. Romo n, O. Micheloud „Power quality of actual grids with plug-in electric vehicles in presence of renewables and micro-grids“, 2013. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115001021>. [Kasutatud 10. 04. 2019].
- [34] Yilmaz M, Krein PT. „Review of the impact of vehicle-to-grid technologies on distribution systems and utility interfaces.“, 2013. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6353961>. [Kasutatud 10. 04. 2019].
- [35] „Isejuhtiva sõiduki lähteülesanne ja kontseptsioonilahendus“, [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://docs.google.com/document/d/1vE5k1VILtAt8TZ5fWq-Ns\\_rCsEBYTzysVzRkPeD7j8/edit?usp=sharing](https://docs.google.com/document/d/1vE5k1VILtAt8TZ5fWq-Ns_rCsEBYTzysVzRkPeD7j8/edit?usp=sharing). Kasutatud 10. 04. 2019].
- [36] „Mitu elektriautot on Eestis arvel ja mis marki need on? Vaatame värske edetabeli üle“, 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval:

- <https://www.accelerista.com/soiduauto/elektriauto/mitu-elektriautot-2018/>. [Kasutatud 12. 04. 2019].
- [37] „A Review of Charging Algorithms for Nickel and Lithium Battery Chargers“, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5688489>. [Kasutatud 12. 04. 2019].
- [38] „Analysis of Harmonic Impact of Electric Vehicle Charging on the Electric Power Grid“, 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8283460/>. [Kasutatud 12. 04. 2019].
- [39] „Current Harmonics of EV Chargers and Effects of Diversity to Charging Load Current Distortions in Distribution Networks“, 2013. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6799884>. [Kasutatud 14. 04. 2019].
- [40] „Impact of EV Home Charger on Distribution Transformer Overloading in an Urban Area“, 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8096276>. [Kasutatud 14. 04. 2019].
- [41] „Plug-in electric vehicles as a harmonic compensator into microgrids“, 2017 [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617309526>. [Kasutatud 15. 04. 2019].
- [42] „Fast EV charging station integration with grid ensuring optimal and quality power Exchange“, 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098617315057>

**LISAD**

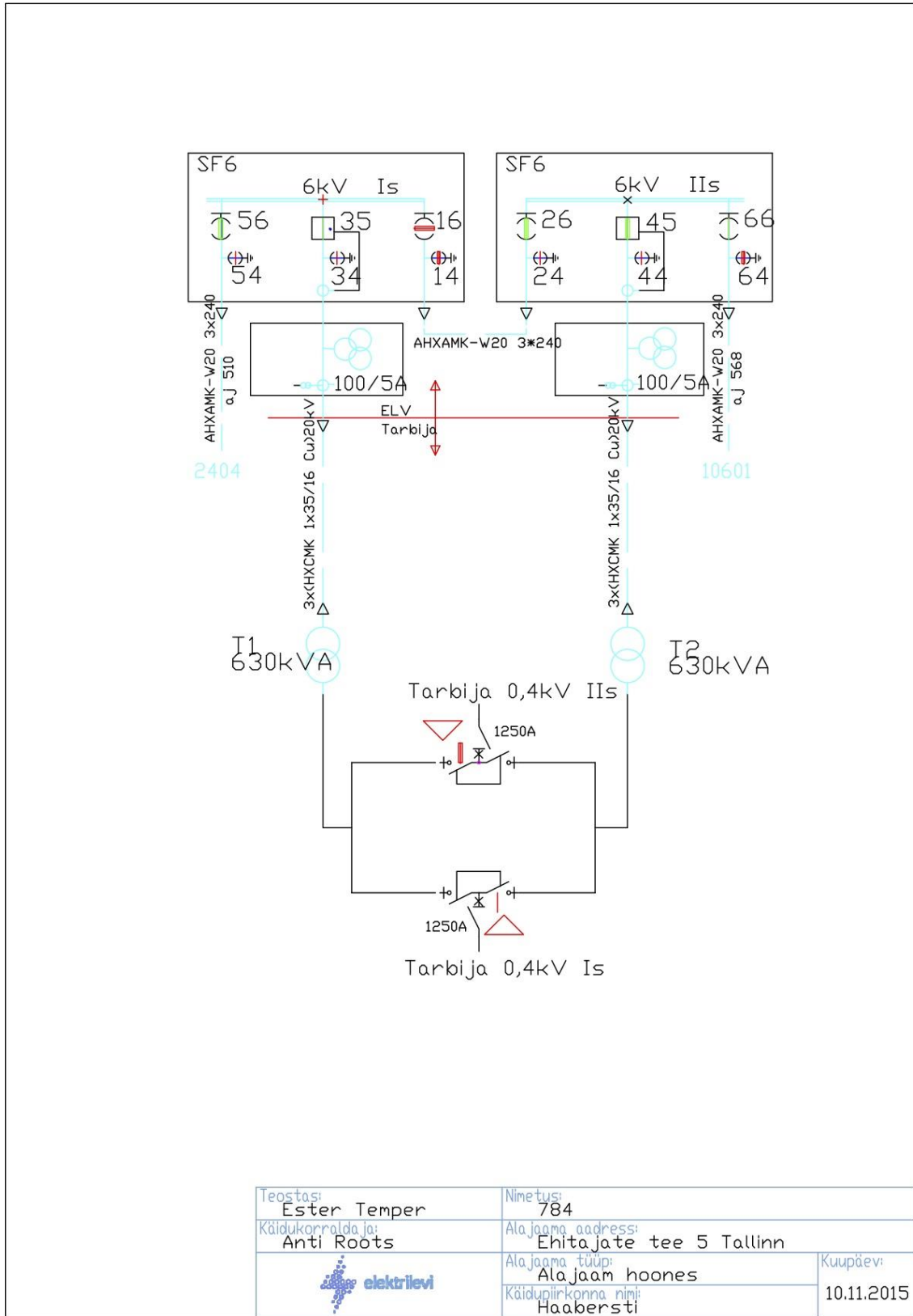
## Lisa 1 Elektriautode laadijate ühendused

Connector Type	Diagram	Number of pins	maximum voltage	maximum current	regulation	
Mode 1		2 L1, L2/N	250 V (A.C.) single-phase	16 A single-phase	CEE 7/4 Tipo F (Schuko)	
Mode 2		5 L1, L2/N, PE, CP, CS	250 V (A.C.) single-phase	32 A single-phase	IEC 62196-2	
Mode 3		7 L1, L2, L3, N PE, CP, PP	250 V (A.C.) single-phase 500 V (A.C) triphasic	32 A single-phase 63 A three-phase	IEC 62196-2	
Mode 3		4,5 or 7 L1, L2, L3, N PE, CP, PP	250 V (A.C.) single-phase 500 V (A.C) three-phase	16/32 A single-phase 32 A three-phase	IEC 62196-2	
Mode 4		9 2 Power, 7 of signal	500 V (d.c.)	120 A (d.c)	IEC 62196-1 UL 2551	
CCS		5 + 2	500 V (d.c)	200 A (d.c)	IEC 62196-3	
CCS		7 + 2	500 V (d.c)	200 A (d.c)	IEC 62196-3	

Tabel L1.1 Elektriautode pistikute standardid, lubatud pinged ja voolud [17]



### Lisa 3 Energeetikamaja alajaama ühenduseskeem



Joonis L3.1 784 6/0.4 kV energeetikamaja alajaama skeem

## Lisa 4 Trafode koormused alajamas

Kuupäev	Tund	38ZEE-00000756-5				38ZEE-00000759-X						
				Energeetikamaja, alajaam 784 trafo 1		Energeetikamaja, alajaam 784 trafo 2						
		5475 A	5475 R	A+	A-	R+	R-	A+	A-	R+	R-	
21.04.2014	11:00:00 PM	1	0,000	0,000	2		7	0	64		21	0
	12:00:00 AM	2	0,000	0,000	1		8	0	63		20	0
	1:00:00 AM	3	0,000	0,000	1		8	0	61		19	0
	2:00:00 AM	4	0,000	0,000	1		7	0	60		14	0
	3:00:00 AM	5	0,000	0,000	2		7	0	57		13	0
	4:00:00 AM	6	0,000	0,000	1		7	0	64		14	0
	5:00:00 AM	7	0,000	0,000	1		8	0	66		15	0
	6:00:00 AM	8	0,000	0,000	1		7	0	85		28	0
	7:00:00 AM	9	0,000	0,000	2		7	0	113		48	0
	8:00:00 AM	10	0,000	0,000	1		7	0	131		58	0
	9:00:00 AM	11	0,000	0,000	1		6	0	137		59	0
	10:00:00 AM	12	0,000	0,000	1		7	0	133		58	0
	11:00:00 AM	13	0,000	0,000	1		7	0	163		69	0
	12:00:00 PM	14	0,000	0,000	2		7	0	143		54	0
	1:00:00 PM	15	0,000	0,000	1		7	0	166		66	0
	2:00:00 PM	16	0,000	0,000	1		7	0	164		65	0
	3:00:00 PM	17	0,000	0,000	1		7	0	144		54	0
	4:00:00 PM	18	0,000	0,000	2		7	0	132		46	0
	5:00:00 PM	19	0,000	0,000	1		7	0	120		39	0
	6:00:00 PM	20	0,000	0,000	1		8	0	114		33	0
	7:00:00 PM	21	0,000	0,000	1		7	0	109		36	0
	8:00:00 PM	22	0,000	0,000	2		7	0	92		28	0
	9:00:00 PM	23	0,000	0,000	1		7	0	76		21	0
	10:00:00 PM	24	0,000	0,000	1		8	0	66		18	0

Joonis L4.1 Trafode koormused päeva lõikes