



EESTI MAAÜLIKOOL  
Metsanduse ja inseneeria instituut

**Rivo Roo**

**ELEKTRIAUTO AKUDE SEISUNDI HINDAMISE  
MEETODID**

**METHODS OF ASSESSING THE CONDITION OF ELECTRIC  
CAR BATTERIES**

Bakalaureusetöö

Juhendaja: lektor Siim Küünal, *PhD*

Tartu 2024

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Bakalaureusetöö	
Autor: Rivo Roo		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia	
Pealkiri: Elektriauto akude seisundi hindamise meetodid			
Lehekülgi: 41	Jooniseid: 14	Tabeleid: 4	Lisasid: 1
Osakond: Metsanduse ja inseneeria instituut ETIS-e teadusvaldkond: 4.8 Elektrotehnika ja elektroonika CERC S-i kood: T190 Elektrotehnika Juhendaja: Siim Kүүinal, <i>PhD</i> Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2024			
<p>Elektriautode arv nii Eestis kui ka kogu maailmas on viimase kümnekonna aasta jooksul jõudsalt kasvanud. Sellega seoses on tõusnud nõudlus akude järele ning vajadus akusid säästlikult kasutada. Elektriauto akude seisundit iseloomustavad mitmed näitajad nagu aku laetuse tase, aku tervises seisund, järelejäänud kasulik eluiga. Selliseid parameetreid ei saa otse mõõta, vaid teiste, mõõdetavate parameetrite alusel hinnata. Keerukamaid mõõtmisi ja uuringuid saab teha laboris, kuid elektriauto aku seisundit on vaja adekvaatselt hinnata pidevalt, et tagada efektiivne ja ohutu akukasutus. Laboris on võimalik teha mitmeid mõõtmisi ning koguda andmeid akuelemendi laadimis- ja tühjendamisandmeid. Nende alusel saab uurida akuelemendi vananemist, mis väljendub laadimistsüklite lühenemises ja akuelementi salvestatava kasuliku energiahulga vähenemises. Samuti suureneb aku vananedes aku sisetakistus. Seoste leidmine aku vananemist iseloomustavate suuruste muutuste vahel aitab akude seisundi hindamist täpsemaks muuta. Töös analüüsitakse Maaülikooli energiavarustuse laborist pärinevaid akuelemendi vananemisandmeid. Andmetest on välja loetav laadimis- ja tühjenemistsüklite lühenemine ning mahutavuse vähenemine akuelemendi vananedes.</p>			
Märksõnad: liitiumioonaku, sisetakistus, aku tervises seisund			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Bachelor's Thesis	
Author: Rivo Roo		Curriculum: Engineering	
Title: Methods of assessing the condition of electric car batteries			
Pages: 41	Figures: 14	Tables: 4	Appendices: 1
Department / Chair: Institute of Forestry and Engineering Field of research and (CERC S) code: T190 Electrical engineering Supervisors: Siim Küünal, <i>PhD</i> Place and date: Tartu 2024			
<p>The number of electric cars in Estonia, as well as globally, has significantly increased over the past decade. Consequently, the demand for batteries has risen, highlighting the need for efficient battery utilization. The condition of an electric car battery is characterized by various indicators such as the driving range, state of charge, state of health, and remaining useful life. These parameters cannot be directly measured but can be estimated based on other measurable parameters. Charging and discharging data of battery cells can be collected in the laboratory and used to study the aging of battery cells. As the battery ages, its capacity decreases and internal resistance increases. Finding correlations between the parameters that characterize battery aging helps improve the accuracy of battery condition assessments. This study analyzes battery aging data from a laboratory at the Estonian University of Life Sciences. The data reveals shortening of the charging and discharging cycles and a decrease in capacity as the battery ages.</p>			
Keywords: Li-ion battery, internal resistance, state of health			

# SISUKORD

SISSEJUHATUS .....	5
LÜHENDID .....	6
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE .....	7
2. ELEKTRIAUTODE AKUD .....	10
2.1. Elektriautode akutehnoloogiad .....	10
2.2. Elektriauto akudele esitatavad nõuded .....	12
2.3. Elektriauto akupakk .....	13
3. MEETODID AKUDE SEISUNDI HINDAMISEKS .....	15
3.1. Ülevaade .....	15
3.2. Aku seisundit iseloomustavad suurused .....	16
3.3. Eksperimentaalsed meetodid .....	17
3.4. Mudelipõhised meetodid.....	18
4. AKUANDMESTIK ENERGIAVARUSTUSE LABORIST .....	20
4.1. Andmete kogumine.....	20
4.2. Andmete ettevalmistus.....	22
4.3. Andmete analüüs.....	23
4.4. Muutused tühjendamistsüklites akuelemendi eluea lõpus .....	27
4.5. Sisetakistuse tuletamine tühjendamisandmetest .....	28
4.6. Akuelemendi sisetakistuse määramine .....	29
4.7. Järeldused.....	33
KOKKUVÕTE .....	35
KASUTATUD KIRJANDUS .....	36
LISAD .....	40
Lisal. Lihtlitsents.....	41

## SISSEJUHATUS

Elektriautode arv nii Eestis kui ka kogu maailmas on viimase kümnekonna aasta jooksul jõudsalt kasvanud. Sellega seoses on tõusnud nõudlus akude järele. Elektriautode eeliseks loetakse süsinikuheite puudumist sõitmisel, millega saab edukalt vältida heitgaaside koondumist tiheda asustustihedusega piirkondades. Samas ei tähenda see, et süsinikuheide ja negatiivne keskkonnamõju laiemalt kogu elektriauto elutsükli jooksul puuduksid, alates tooraine kaevandamisest kuni vanade autode ja nende akude utiliseerimiseni. Arendamist ja hooldamist vajab laadimistaristu ning akude laadimiseks on vaja palju elektrienergiat.

Elektriauto akude seisundit iseloomustavad mitmed näitajad nagu järelejäänud sõiduulatus enne järgmist laadimist, laetuse tase, aku tervises seisund, järelejäänud kasulik eluiga. Selliseid parameetreid ei saa otse mõõta, vaid teiste, mõõdetavate parameetrite alusel hinnata. Keerukamaid mõõtmisi ja uuringuid saab teha laboris, kuid elektriauto aku seisundit on vaja adekvaatselt hinnata pidevalt, et akukasutus oleks efektiivne ja ohutu.

Bakalaureusetöö esimene osa annab ülevaate aktuaalsest kirjandusest, mis käsitleb akude seisundi hindamist. Sellele järgneb ülevaade akutehnoloogiatest ja akude olulistest parameetritest. Lisaks on fookuses meetodid, kuidas akude seisundit hinnata. Teine osa tööst hõlmab akuelementide mõõtmisi ning tulemuste analüüsi, mis viidi läbi Eesti Maaülikooli energiavarustuse laboris. Akuelemendi vananemisandmete põhjal arutletakse esimeses osas tutvustatud aku seisundi hindamise meetodite üle.

Akude seisundi hindamine on lai valdkond ning see bakalaureusetöö annab sissejuhatava ülevaate akude seisundi hindamise probleemistikast ja meetoditest. Töö eesmärk on Maaülikoolis kohapeal tehtud katsete ja mõõtmiste tulemusena saadud akuelemendi vananemisandmete analüüs.

## LÜHENDID

AI	<i>Artificial Intelligence</i>	Tehisintellekt
ALT	<i>Accelerated life testing</i>	Eluea kiirendatud testimine
BMS	<i>Battery management system</i>	Akuhaldussüsteem
EIS	<i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i>	Elektrokeemiline impedants-spektroskoopia
LFP	<i>Lithium iron phosphate</i>	Liitiumraudfosfaat[aku]
ML	<i>Machine learning</i>	Masinõpe
NMC	<i>Nickel manganese cobalt</i>	Nikkel-magneesium-koobalt[aku]
NMCA	<i>Nickel manganese cobalt aluminium</i>	Nikkel-magneesium-koobalt-alumiinium[aku]
RUL	<i>Remaining Useful Life</i>	Järelejäänud kasulik eluiga
SoC	<i>State of Charge</i>	Laetuse tase
SoH	<i>State of Health</i>	Terviseseisund, sooritusvõime

# 1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Aku seisundi täpne hindamine on oluline, sest adekvaatne teadmine aku seisundist annab pildi aku võimekusest antud hetkel ning seda teadmist saab kasutada akukasutuse efektiivsemaks muutmiseks, samuti aku eluea planeerimiseks ja ohutuse suurendamiseks. Aku seisundi hindamiseks on traditsiooniliselt olnud vajalik aku laborisse viia, et seal teste ja mõõtmisi läbi viia, vahel ka aku lahti võtta. See meetod ei sobi igapäevakasutuses olevate akude seisundi regulaarseks hindamiseks ning seetõttu otsitakse võimalusi aku seisundit määrata sealsamas, kus akut kasutatakse, hinnates seisundit selliste parameetrite alusel, mida on suhteliselt lihtne mõõta. Selleks on vaja leida seosed lihtsasti mõõdetavate parameetrite ja aku seisundit iseloomustavate suuruste vahel.

On kirjutatud ülevaateartikleid meetoditest aku seisundi hindamiseks, nende plussidest ja miinustest [1]. Aku omadused konkreetsel hetkel sõltuvad nii aku sisemistest kui ka välistest tingimustest: temperatuur, aku vanus, akukeemia jne. Olulisteks akut iseloomustavateks parameetriteks on laetuse tase ja aku terviseseisund, mis annavad pildi aku võimekusest ning aku järelejäänud eluea pikkusest. Aku vananemisega kaasneb mitmete aku omaduste muutus, nagu näiteks aku sisetakistuse suurenemine ja mahutavuse vähenemine. Meetodeid aku seisundi hindamiseks, mida saab kasutada ilma akut laborisse viimata, tuleb muuta täpsemaks, kusjuures oluline pole ainult algoritmi enda paikapidavus, vaid ka suurem täpsus akuelementidelt pingel, voolul, temperatuuri mõõtmisel.

Mitmed uurimisgrupid on võrrelnud erinevate masinõppe (*ML, Machine Learning*) meetodite sobivust aku terviseseisundi hindamiseks. Uuritud meetodite hulgas on lineaarsed mudelid, polünoomiaalse regressiooni mudelid jne. Algoritmide efektiivsuse parandamiseks saab katsetada mitmesuguseid filtreid. Aku terviseseisundi hindamine toetab muude näitajate, näiteks laetuse taseme korrektset leidmist. [2, 3]

Probleemidena tuuakse välja, et masinõppe abil välja töötatud mudel võivad osutada valeks, niipea kui seda rakendada mõnel akul, mille kasutusprofiil ja -tingimused on teistsugused kui akudel, mille andmeid on kasutatud mudeli väljatöötamisel. Akusid kasutatakse väga paljudes eri tingimustes, kuid masinõppe algoritme treenimiseks ja testimiseks kasutatavad

andmehulgad katavad ainult väga piiratud hulga akude kasutustingimusi ja -profiile [4]. Seega võib masinõppe abil loodud mudel anda näiliselt hea tulemuse, kui seda valideeritakse kasutada oleva testandmestikuga, kuid niipea kui rakendada mudelit teistsugustes tingimustes kasutatud akul, on näha, et mudel ei sobi.

Uuritud on masinõppe abil aku terviseseisundi ja laetuse taseme koos hindamist [5]. Kriteeriumiks, mida akude seisundi hindamisel arvesse võtta, on muuhulgas mudelite väljatöötamiseks ja ennustuste tegemiseks vajalik arvutusvõimsus ning aeg, palju erinevad sammud kogu protsessi aega võtavad. Liiga ressursinõudlike algoritmide puhul võib uurida võimalusi ressursivajadust vähendada – parameetrite reguleerimine, andmestiku täiendav töötlemine jne.

Mitmete uurimistööde käigus on loodud ja edasiseks kasutamiseks avalikuks tehtud akude vananemisandmestikke, mis sisaldavad akude laadimise ja tühjendamise käigus kogutud andmeid. Mitmed uurimisrühmad on masinõppe mudelite väljatöötamisel kasutanud teiste loodud avalikke andmestikke. Osa uurimisrühmi on kommertskasutuses olevatelt akudelt andmeid kogunud või ise laboritingimustes akusid laadides ja tühjendades andmeid tekitanud. Ülevaate mõnedest avalikest akude andmestikest annab tabel 1.1.

**Tabel 1.1.** Mõned avalikud akude laadimistsükli andmestikud

Ingliskeelne nimetus	Aasta	Selgitus
NASA battery dataset [6]	2007/2008	Mõnekümne liitiumaku vananemisandmed. Elektrokeemilise impedantspektroskoopia abil mõõdeti näivtakistust.
Lithium-ion battery degradation dataset based on a realistic forklift operation profile [7]	2023	Sisaldab kolme akuelemendi vananemisandmeid, mida tühjendati vastavalt akutoitega tõstuki kasutusprofiilile.
A battery dataset for electric vertical takeoff and landing Aircraft [8]	2021/ 2023	22 akuelemendi andmed kokku rohkem kui 21 tuhande laadimistsükli kohta; andmestik imiteerib elektriliste õhusõidukite akukasutust.
Randomized and Recommissioned Battery Dataset [9]	2022 / 2024	Sisaldab 26 akupaki laadimistsükli andmeid. Pärineb NASAst.
Stanford-Relyion Second-Life Li-ion Battery Dataset [10]	2024	Sisaldab andmeid mõnede akude kohta, mille esialgne ettenähtud eluiga on lõppenud ja mida võib seejärel kasutada mingil muul otstarbel.
Dataset for rapid state of health estimation of lithium batteries, DIB_Data [11]	2021 / 2023	Sisaldab 25 akuelemendi vananemisandmeid, kus algselt uusi akuelemente laeti ja tühjendati erinevate terviseseisundi tasemeteni (80, 85, 90, 95 ja 100%).



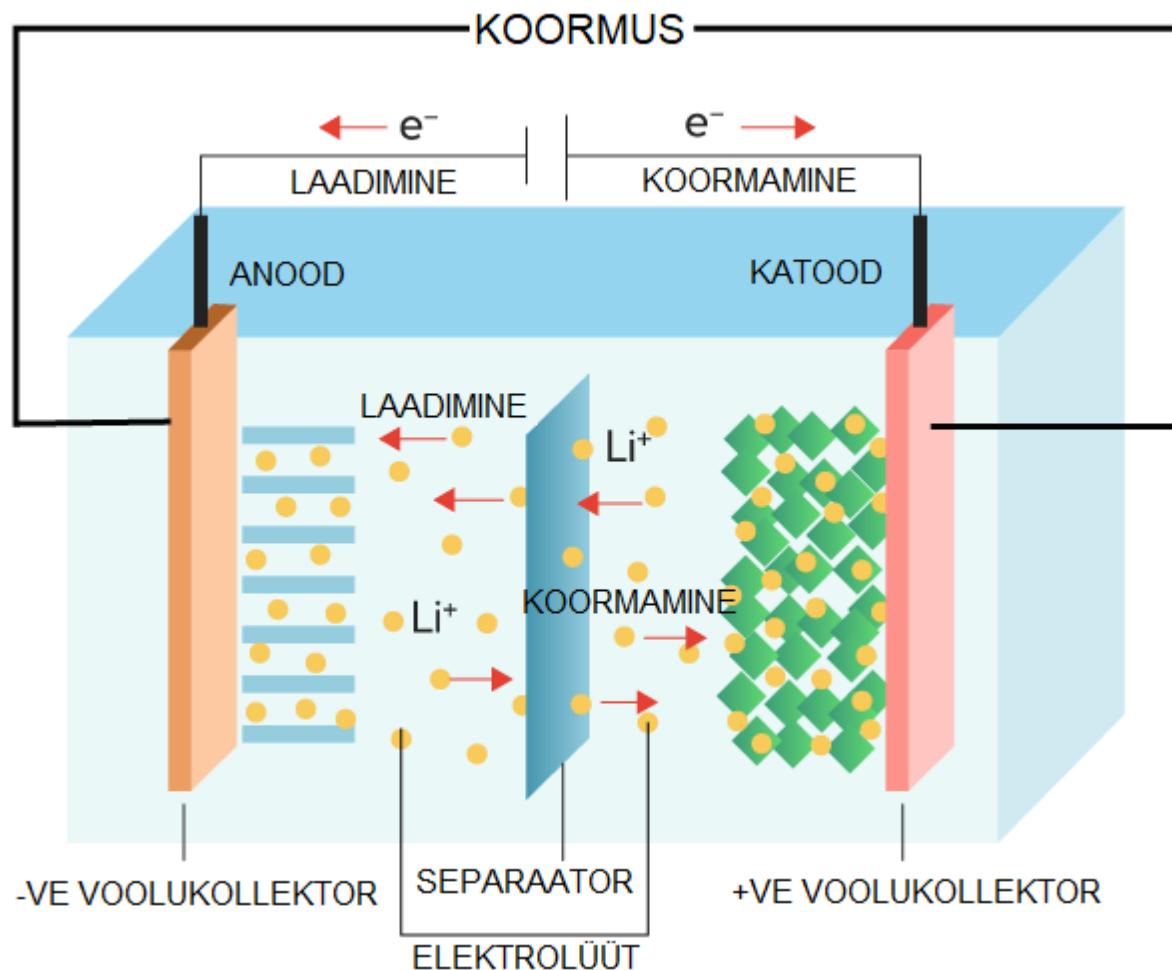
Enamasti on püütud akude laadimist ja tühjendamist varieerida, samuti võib laadimistsükklite läbiviimisel olla aluseks võetud mingi seade või olukord, millele omast akukasutust püütakse imiteerida. Andmete kogumisel on akude vananemist sageli kiirendatud, tehes palju laadimistsükkeid järjest (samas kui paljud akud seisavad päriselus osa aega kasutuseta) ning eksperimenteerides eri temperatuuridega – kõrgetel ja madalatel temperatuuridel on oodata aku kiiremat vananemist. Inglise keeles kirjeldab sellist eluea kiirendatud testimist mõiste *accelerated life testing (ALT)*.

Mitmed andmestikud on koostatud eesmärgiga kasutada neid masinõppe mudelite arendamisel. Andmetes võib ette tulla lünki, näiteks mingisuguse parameetri registreerimine on vahel ebaõnnestunud. Kogutavate andmete hulgas on tavaliselt pinge ja vool nii tühjendamisel kui ka laadimisel, akuelemendi või -mooduli temperatuurid, aga ka näiteks sisetakistus või tegelik mahutavus vastaval ajahetkel.

## 2. ELEKTRIAUTODE AKUD

### 2.1. Elektriautode akutehnoloogiad

Elektriautodes on tänapäeval peamiselt kasutusel liitiumioonakud, lühidalt liitiumakud. Liitiumakud on elektrokeemilised vooluallikad, mille peamisteks osadeks on katood, anood ja elektrolüüt. Aku ehitus on joonisel 2.1.



Joonis 2.1. Liitiumioonaku ehitus [12].

Liitiumioonakude anoodiks on enamasti grafiit ning tüübi alusel liigitamine toimub katoodi materjali järgi. Katoodis kasutatakse liitiumi koos teiste metallidega. Elektrolüüt võimaldab liitiumioonide liikumist anoodilt katoodile ja vastupidi, mis tekitab elektronide voo ehk elektrivoolu. Seega tekib elektrivool akus siis, kui elektronid ja ioonid liiguvad anoodi ja katoodi vahel. [13]

Levinuimaks akutüübiks elektriautodes on NMC-akud, kus katoodis kasutatakse lisaks liitiumile niklit, mangaani ja koobaltit. Sellele lähedane akutüüp on NMCA-akud, kus on katoodis lisaks kasutusel alumiinium. [14]

NMC-akude kõrval teine levinud akude liik on liitiumraudfosfaatakud (LFP-akud ehk  $\text{LiFePO}_4$ -akud). LFP-akud on kasutusel paljudes Hiinas toodetud elektriautodes, neid kasutavad Tesla, Toyota, Ford ja Hyundai [13]. LFP-akudes kasutatakse katoodi materjalina liitiumraudfosfaati. Katoodi materjalil on märgatav mõju aku hinnale, kestvusele ja võimekusele [15].

LFP-akud on NMC-akudest odavamad ja pikema elueaga (üle 10 aasta), samas väiksema energiatihedusega ning toimivad madalamatel temperatuuridel halvemini. NMC-aku energiatiheduseks loetakse 190–260 Wh/kg ja LFP-akudel 90–130 Wh/kg [16]. LFP-akud on ohutumad kui NMC-akud, kus tuleb sagedamini ette piiramatu soojenemist (*thermal runaway*) [17]. Piiramatu soojenemine akuelemendis on olukord, kus elemendi temperatuur kasvab kontrollimatult ning akuelement võib süttida.

LFP-aku soovitatav töötemperatuuride vahemik on 0..+60 °C. Temperatuuridel alla 0 °C väheneb LFP-akude sooritusvõime 10–20% võrra; temperatuuri langedes alla 15-20 °C väheneb aku sooritusvõime 40%. NMC-akud töötavad temperatuuridel -20..+60 °C. Seetõttu saab NMC-akusid enamasti kasutada ilma vajaduseta neid eraldi soojendada, kuid LFP-akude kasutamiseks miinuskraadide juures on vajalik nende soojendamine, mis omakorda vajab energiat. [18]

LFP-akud taluvad suuremat arvu laadimistsükleid (üle 3000) kui NMC-akud (1000-2000) [19]. See annab LFP-akudele ka pikema eluea aastates – üle 10, NMC-akudel on eluiga lühem, pärast 3–4 aastat võib toimuda kiire sooritusvõime vähenemine [20].

LFP-akusid peetakse keskkonnasõbralikumaks kui NMC-akusid, kuna kasutatavad materjalid on vähem toksilised ning kergemini taaskasutatavad. Samuti on raud ja fosfor paremini kättesaadavad kui NMC-akudes kasutatavad koobalt ja nikkel. [21]

## 2.2. Elektriauto akudele esitatavad nõuded

Tabel 2.1. annab ülevaate akudele esitatavatest nõuetest ja seonduvatest probleemidest.

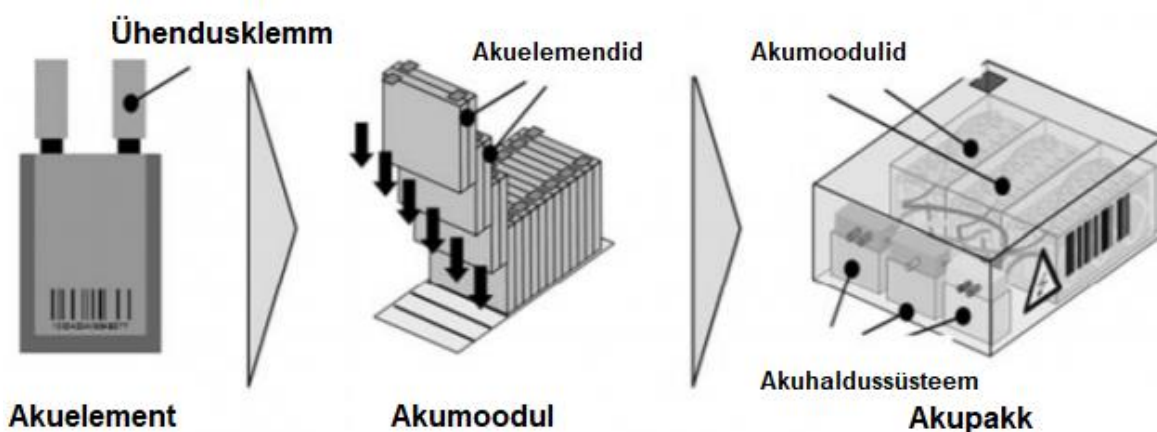
**Tabel 2.1.** Elektriauto akudele esitatavad olulisemad nõuded

Nõue	Kommentaar
Madal hind	Liitiumakude hinnad on viimase 10 aasta jooksul ligikaudu 5 korda langenud ning ennustatakse jätkuvat hinnalangust: 80 \$/kWh-ni aastal 2030 [22]. Siiski moodustab akupaki hind ligikaudu 20% auto hinnast [23].
Suur energiatihedus	Energiatihedus näitab, kui palju energiat massiühiku kohta on võimalik akusse salvestada. Suurem energiatihedus võimaldab vähendada aku massi ning pikendada sõiduulatust. Liitiumioonaku energiatihedus sõltub konkreetsest aku tüübist ja võib küündida ca väärtuseni 280 Wh/kg [24]. Näiteks Tesla Model 3 LFP-aku mahutavusega 55 kWh kaalub ca 440 kg [25] ja see moodustab ca 24% auto tühimassist [26].
Ohutus	Elektriauto akudega on seotud süttimisoht, mida reeglina põhjustab akude piiramatu soojenemine. Liitiumioonakudes võib liitiumdendriit koguneda katoodile, mille tagajärjel tekib lühis ja element soojeneb ning tuleohtlik elektrolüüt süttib [27]. Lisaks võib inimesele ohtlik olla kokkupuude akudest lähtuva suure pingega või vooluga.
Lühike laadimisaeg	Aku laadimisaeg sõltub peamiselt laadimisvõimsusest ning kui palju akut laadida soovitakse. Ülikiirllaadijaga (150 kW) laadides võtab 20 kWh jagu laadimist aega 7,5 minutit [28], mis on kauem kui võtab tavaliselt aega sise põlemismootoriga auto tankimine. Samas laetakse elektriauto akusid enamasti aeglasemate laadijatega. Kiirllaadijaga laadimine ei halvenda siiski akude sooritusvõimet ega akude eluiga [29].
Pikk eluiga	Elektriauto akude puhul on oluline, et samu akusid saaks kasutada aastaid, ilma et akude sooritusvõime oluliselt väheneks. Samuti on oluline, et akud taluksid suurt hulka laadimistsükleid. Tänapäevased liitiumakud peavad vastu tuhandeid laadimistsükleid [30] ja eluiga võib mõnede tehnoloogiat puhul, näiteks LFP, olla üle 10 aasta.
Vähene isetühjenemine	Isetühjenemine tähendab aku laetuse taseme vähenemist, kui aku seisab kasutuseta. Enamusel liitiumakudel jääb isetühjenemise määr 0,5–3,0% piiresse kuus. Isetühjenemist võib põhjustada niiskus või mikrolühised, samuti on isetühjenemine intensiivsem kõrgematel temperatuuridel – temperatuuri tõusmisel 10 °C võrra liitiumaku isetühjenemine kahekordistub – ning aku suurema laetuse taseme korral. [31]
Madalate ja kõrgete temperatuuride talumine	Optimaalne temperatuur liitiumakudele on 21,5 °C. Nii kõrged kui ka madalad temperatuurid mõjutavad akut ja sellest tulenevalt sõiduulatust. Temperatuuril – 20 °C on auto sõiduulatus 40% võrra lubatud sõiduulatusest väiksem; temperatuuril +40 °C on sõiduulatus 20% lubatust väiksem. [32]

Et elektriautod rohkem kasutuses oleksid, peavad nad olema kasutaja jaoks piisavalt odavad, ohutud ja mugavad kasutada. Võrreldes sise põlemismootoriga autodega on elektriautodega seotud hirm, et aku saab enne laadimispunkti jõudmist tühjaks (*range anxiety*), probleemiks on pikk laadimisaeg ka võimsa kiirllaadijaga, aku – ja seega terve auto – võrdlemisi suur mass, aku sooritusvõime vähenemine madalatel temperatuuridel, aku mahutavuse vähenemine aja jooksul jne. Samas on elektriautode hooldus lihtsam ja odavam ning sõidukulud väiksemad – eriti kui laadida koduse laadimisjaamaga madala elektrihinna korral.

### 2.3. Elektriauto akupakk

Elektriauto akupakk jaguneb akumooduliteks, mis omakorda koosnevad akuelementidest – joonis 2.2.



**Joonis 2.2.** Elektriauto akupakk ja selle komponendid [33].

Osa akuelemente on omavahel ühendatud rööpselt ja osa jadamisi, nii et saavutada nõutav pinge ja mahutavus. Suure osa automudelite puhul on akupaki nimipinge ca 400 V, mille jaoks ühendatakse vastav arv akumooduleid jadamisi, et pinged liituksid [34].

Akuelement on väike konteiner, kuhu on salvestatud energia, ja tavaliselt on ühe elemendi nimipinge vahemikus 3-4 V. Akumooduleid on enamasti võimalik ühekaupa vahetada ning akupaki jagamine mooduliteks aitab akupakki paremini monitoorida ja kontrollida ning piirata tule levikut, kui mingis teises moodulis toimub süttimine [33].

Elektriauto oluliseks komponendiks on akuhaldussüsteem (*BMS, Battery Management System*). Selle ülesandeks on [35]:

- aku talitluse jälgimine;
- aku kaitsmine;
- aku seisundi hindamine;
- akukasutuse optimeerimine;
- aku seisundi raporteerimine teistele seadmetele.

Akuhaldussüsteem jälgib mitmeid aku parameetreid: pinget, voolu, temperatuuri. Nende parameetrite alusel saab tuvastada ohtlikke seisundeid (nt liiga kõrge temperatuur), potentsiaalselt riknenud elemente jne.

Akuhaldussüsteem hindab mõõdetud väärtuste järgi aku terviseseisundit ja laetuse taset ning tegeleb akuelementide tasakaalustamisega, kus hoolitsetakse, et eri akuelemendid oleksid võrdselt laetud. Nii tühjenemisel kui ka laadimisel ei tarvitse kõigi akupakis olevate akuelementide laetuse tase muutuda sama kiirusega, mille tulemusena võib akupakis korraga olla erineva laetuse tasemega akuelemente. See olukord on ebasoovitav, sest siis väheneb akupaki mahutavus ning eluiga. Akuhaldussüsteemi üks ülesandeid on sellist olukorda vältida. Selleks võib kas rohkem laetud akuelementide laetuse taset takistite abil vähendada või kanda kõrgema laetuse tasemega akuelementidelt energiat vähem laetud akuelementidele. [36]

### **3. MEETODID AKUDE SEISUNDI HINDAMISEKS**

#### **3.1. Ülevaade**

Aku omadused aja jooksul halvenevad. Üks esimesi indikaatoreid, mis annab autoomanikule ettekujutuse elektriauto aku seisundist, on sõiduulatus – ühe laadimisega läbitav vahemaa aja jooksul väheneb. Samas sõltub sõiduulatus ka näiteks õhutemperatuurist ja sõidu iseloomust (nt kas sõidetakse linnas või maanteel).

Samuti annab aku seisundist teatava pildi laadimise efektiivsus – kui aku laadimiseks kulub varasemast rohkem energiat, võib samuti tegu olla aku seisundi halvenemisega.

Eelpoolkirjeldatud meetodid annavad kasutajale ainult intuitiivse ülevaate aku seisundist. Aku seisundit peaks olema võimalik ka võimalikult täpselt arvuliselt hinnata ja väljendada. See aitab tagada ohutust, planeerida ette akude väljavahetamist ja optimeerida aku kasutust.

Üldjoontes saab aku seisundit hinnata kahel viisil.

1. Viies aku laborisse, tehes seal teste ja mõõtmisi, vajadusel võttes aku lahti, mille järel ei tarvitse enam olla võimalik akut eelnevale samaväärselt kokku panna. Selline lähenemisviis on küllalt täpne, kuid aeganõudev, spetsiaalseid seadmeid ja teadmisi nõudev. Seega ei sobi see viis tavakasutuses olevate elektriautode akude seisundi hindamiseks, kuna aku seisundit on vaja teada jooksvalt.
2. Kasutades lihtsamini mõõdetavaid parameetreid nagu pinge, vool ja temperatuur, saab hinnata aku seisundit vastavate algoritmide järgi. Selliste algoritmide väljatöötamiseks on vaja n-ö laboriandmeid, mille alusel parameetrite vahel seosed leida. Sellisel viisil aku seisundi hindamine sobib elektriautodes kasutamiseks, kuna seisundit saab jooksvalt arvutada. Probleemiks on hinnangu võimalik ebatäpsus. Täpsete algoritmide väljatöötamiseks on vaja suurel hulgal lähteandmeid, aga nende väljatöötamine (nt akusid laboris eri tingimustel laadides-tühjendades) on ressursimahukas töö; päriselus tuleb ette palju erinevaid akude kasutusprofiile ja eri tingimusi, kus akusid kasutatakse.

### 3.2. Aku seisundit iseloomustavad suurused

Olulisemad aku seisundit iseloomustavad suurused on järgmised.

1. Aku laetuse tase (*SoC, State of Charge*) – iseloomustab akus parasjagu olevat järelejäänud energiahulka võrreldes täielikult laetud samas akus oleva energiahulgaga. Laetuse taset väljendatakse protsendina 0..100% ning seda oleme harjunud nägema näiteks mobiiltelefoni ekraanil, samuti kuvab seda elektriauto. Kuvada võib seda ka lihtsustatult, näiteks mõned tööriistaakud kasutavad laetuse taseme näitamiseks teatud arvu LEDe – mida rohkem LEDe põleb, seda kõrgem on laetuse tase ehk seda rohkem täis aku on. Elektriauto puhul saab laetuse taseme alusel, kasutades ka muud saadaolevat infot (ilmastik, sõiduprofiil jne), leida järelejäänud sõiduulatuse.
2. Aku terviseseisund (*SoH, State of Health*) – iseloomustab aku võimekuse vähenemist ajas. Väljendatakse protsendina vahemikus 0..100%. Puudub ühtne kokkulepitud definitsioon, kuidas seda väärtust määrata. Sõltuvalt aku kasutusvaldkonnast võivad terviseseisundi määramisel oluliseks osutada erinevad asjaolud. Täiselektriliste autode puhul on terviseseisund korrelatsioonis aku järelejäänud mahutavusega, aga mõnel teisel juhul võib terviseseisund iseloomustada näiteks maksimaalset võimsust, mida akust on võimalik saada.
3. Aku järelejäänud kasulik eluiga (*RUL, Remaining Useful Life*) – iseloomustab, kaua saab akut veel kasutada, kuni tema terviseseisund langeb alla teatud taseme, tavaliselt alla 70–80%. Järelejäänud kasulikku eluiga võib väljendada ajahikutes (tunnid, päevad, aastad) või laadimistsüklite arvuna.

Nagu öeldud, ei saa ühtegi nimetatud parameetritest otseselt mõõta. Neid on võimalik hinnata teiste parameetrite alusel. Küsimus on selles, kuidas mõõdetavate suuruste alusel võimalikult täpselt ja võimalikult väikese vaevaga aku seisundit iseloomustada.



### 3.3. Eksperimentaalsed meetodid

Eksperimentaalsed meetodid aku seisundi hindamiseks on sellised, mis viiakse läbi laboris, ning need jagunevad otsesteks ja kaudseteks [1]:

- otseste meetodite hulka kuuluvad näiteks aku mahutavuse, sisetakistuse ja näivtakistuse määramine.
- kaudsete meetodite hulka kuuluvad näiteks laadimiskõvera (*charging curve*) meetod, ultraheliuuring (*ultrasonic inspection*), ICA (*incremental capacity analysis*) ja DVA (*differential voltage analysis*).

Aku mahutavuse mõõtmise otsesim meetod on laadida aku täis ja seejärel tühjaks, mõõtes akust võetud voolu ja aega, mille alusel saab arvutada mahutavuse ampertundides. Mahutavuse vähenemine annab märku aku tervise seisundi halvenemisest.

Aku sisetakistus mõjutab aku võimet voolu anda; mida suurem on sisetakistus, seda suurem on energiakadu, mis eraldub soojusena. Aku vananedes sisetakistus suureneb, sest elektroodidel tekib korrosioon [37]. Tervise seisundi arvutamiseks sisetakistuse kaudu kehtib valem [38]:

$$SoH = \frac{R_c - R_a}{R_n - R_a} \cdot 100 \quad (3.1)$$

kus

$R_n$  – uue aku algne sisetakistus ( $\Omega$ )

$R_c$  – aku praegune sisetakistus ( $\Omega$ )

$R_a$  – aku sisetakistus eluea lõpus ( $\Omega$ )

Meetodid aku sisetakistuse määramiseks on järgmised.

1. DCIR-meetod ehk sisetakistuse mõõtmine alalisvoolu abil. See meetod on standardiseerimata ning lihtsaim viis seda teha on mõõtes elektromotoorjõudu aku klemmidelt, kui aku ei ole vooluringi ühendatud, ning mõõtes sama aku klemmidelt pinget, kui aku on vooluringi ühendatud, ja arvestades vooluringis olevat voolu või vooluringi (v.a. aku ise) kogutakistust, on võimalik aku sisetakistus välja arvutada.

2. ACIR-meetod ehk sisetakistuse määramine vahelduvvoolu abil. Reeglina lastakse siin läbi akuelemendi vahelduvvool voolutugevusega ligikaudu 100 mA ja sagedusega 1000 Hz ning mõõdetakse akuelemendi pinget. Jagades pinget voolutugevusega, saadakse näivtakistus. Saadud näivtakistuse reaalarvuline osa (aktiivtakistus) ongi see, mida loetakse sellisel meetodil leitud sisetakistuseks. See meetod on tööstuses laialdaselt kasutusel. [39]
3. Elektrokeemiline impedantspektroskoopia (EIS) on meetod, kus akule rakendatakse väike vahelduvvool, nagu ACIR-meetodilgi, kuid selle sagedust varieeritakse millihertsidest megahertsideni. Jälgitakse resultantvoolu või -pinget ning selle järgi on võimalik teha järeldusi aku füüsikaliste omaduste kohta. Katseseade on kallis, katse läbiviimine nõuab aega ja katse läbiviijal peab olema spetsiaalne väljaõpe. Seda meetodit kasutatakse peamiselt teadusasutustes. [40]

Lisaks sisetakistuse mõõtmisele on võimalik viia akuga läbi mitmeid laadimis- ja tühjendamistsükleid ning jälgida, kuidas muutub nende jooksul pinget ja mahutavus. Samuti on uuritud võimalusi hinnata aku seisundit ultraheli abil [41].

### **3.4. Mudelipõhised meetodid**

Mudelipõhised meetodid on sellised, kus eksperimentaalsel teel saadud andmete alusel leitakse seosed aku seisundit iseloomustavate parameetrite ning mõõdetavate parameetrite vahel. Mudelipõhised meetodeid saab kasutada, kui varasemast on olemas piisav hulk eksperimentaalsel teel saadud tulemusi. Sellised meetodid võimaldavad aku eluiga määrata kaudselt, ilma et akut oleks vaja laborisse viia. Seetõttu sobivad mudelipõhised meetodid, erinevalt eksperimentaalsetest, elektriautode akuhaldussüsteemidesse. Mudelipõhiste meetodite alla kuuluvad lisaks masinõppele näiteks Kalmani filtrid, neurovõrgud ja hägusloogika mudelid. [1]

Üks alamosa mudelipõhistest meetoditest on masinõppel põhinevad meetodid. Masinõpe on tehisintellekti haru ning selle defineeris Arthur Samuel 1950ndatel kui uurimisvaldkonna, mis annab arvutitele õppimisvõime ilma neid selleks otseselt programmeerimata. [42, 43]

Siin on vajalikud varasemad akude vananemisandmestikud ning neid kasutatakse mudelite loomiseks, mis oskavad aku seisundit hinnata. Varasemad andmestikud on sisendiks mudeli

treenimisele. Hea tulemuse saamiseks peab olema andmeid palju ning need peavad katma mitmesuguseid kasutusolukordi ja -profiile, nt akude kasutamine ja laadimine eri temperatuuridel, eri voolutugevusega jne.

Masinõppe põhised meetodid ei pea teadma, milline on aku elektrokeemiline koostis. Küll aga ei tööta sama mudel sama hästi erinevate akutehnoloogiatega, vaid iga akutehnoloogia jaoks on vaja vastavat liiki akude vananemisandmeid, mille alusel mudel treenida.

## 4. AKUANDMESTIK ENERGIAVARUSTUSE LABORIST

### 4.1. Andmete kogumine

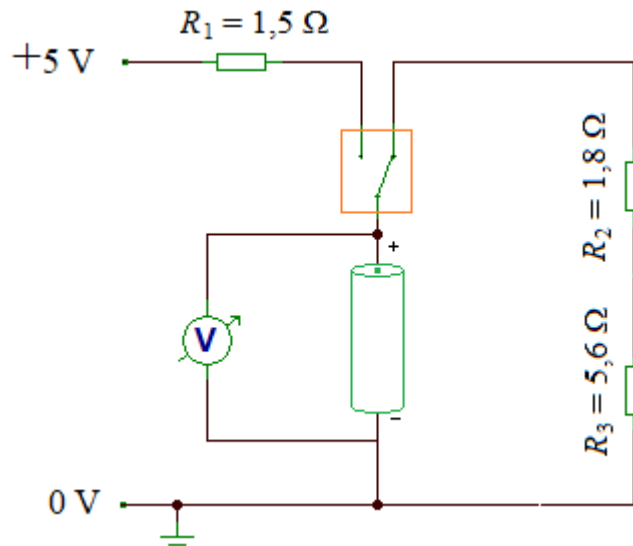
Töö praktilises osas on vaatluse all Maaülikooli energiavarustuse laboris kogutud akuelemendi laadimis- ja tühjendamistsüklike andmed. Laeti ja tühjendati ühte akuelementi, mille põhiparameetrid on tabelis 4.1. Akuelement ei pärine küll elektriautost, kuid on elektriautodes kasutatavatele akuelementidele piisavalt sarnane, et seda uurimiseks kasutada.

**Tabel 4.1.** Maaülikooli laboris uuritud akuelemendi parameetrid [44]

Tüüp	Liitium-polümeeraku
Mudel	13350
Nimipinge	3.7 V
Nimimahutavus	1,85 Wh (500 mAh)
Diameeter	13,5 mm
Kõrgus	35,5 mm

Tegemist on polümeerakuga, mis tähendab, et elektrolüüt on geelitaoline polümeer. Sellistele akudele on iseloomulik teistest liitiumakudest kõrgem energiatihedus, mistõttu sobib ta kasutamiseks rakendustes, kus on oluline, et aku oleks võimalikult väike. [45]

Akuelemendi laadimiseks ja tühjendamiseks kasutati seadet, mille põhimõtteskeem on joonisel 4.1.



**Joonis 4.1.** Akuelemendi laadimiseks ja tühjendamiseks kasutatud seadme põhimõtteskeem.

Akuelemendi laadimine toimub, kui joonisel 4.1. nähtav lüliti on vasakpoolses asendis. Kui lüliti on parempoolses asendis, toimub akuelemendi tühjendamine läbi takistite. Ümberlülitusi laadimis- ja tühjendamistsüklite vahel tehti relee abil, mille juhtimiseks ja andmete registreerimiseks kasutati mikrokontrollerit ESP8266MOD. Akuelementi tühjendati ja laeti järjest: kui pinge langes alla 3,2 V, toimus relee abil lülitus laadimisrežiimile, ning kui pinge tõusis üle 4,2 V, toimus relee abil ümberlülitus tühjendamisrežiimile.

Tühjendamisel liikus vool läbi kahe jadamisi ühendatud takisti, mille kogutakistus oli

$$R = R_2 + R_3 = 1,8 + 5,6 = 7,4 \Omega$$

Arvestades akuelemendi nimipinget 3,7 V, saame voolutugevuseks tühjendamisel

$$I_t = \frac{U}{R} = \frac{3,7}{7,4} = 0,5 A$$

Kuna akuelemendi mahutavus on 500 mAh, siis sellise vooluga tühjendades saab akuelement tühjaks 1 tunniga, mis tähendab, et kiirus (*C-rate*) tühjendamisel on 1 C. Tuleb siiski arvestada, et kuna tühjendamise käigus pinge väheneb, siis väheneb ka vool ning seega ei ole vool kogu tühjendamise käigus sama suur.

## 4.2. Andmete ettevalmistus

Töös analüüsitakse 10 ööpäeva jooksul kogutud 176 laadimis- ja tühjendamistsükli andmeid. Andmepunkte on kokku 85 489. Fail, kuhu akuelemendi laadimise ja tühjendamise seade andmed salvestas, sisaldas igal real kellaega ning millivoltides registreeritud pinget akuelemendi klemmidel. Andmete kujust sisendfailis annab ettekujutuse joonis 4.2.

```
10:48:46.333 -> 3559.43  
10:48:55.638 -> 3554.70  
10:49:05.645 -> 3550.14
```

**Joonis 4.2.** Sisendandmete faili esimesed read.

Andmed olid salvestatud 10-sekundilise sammuga.

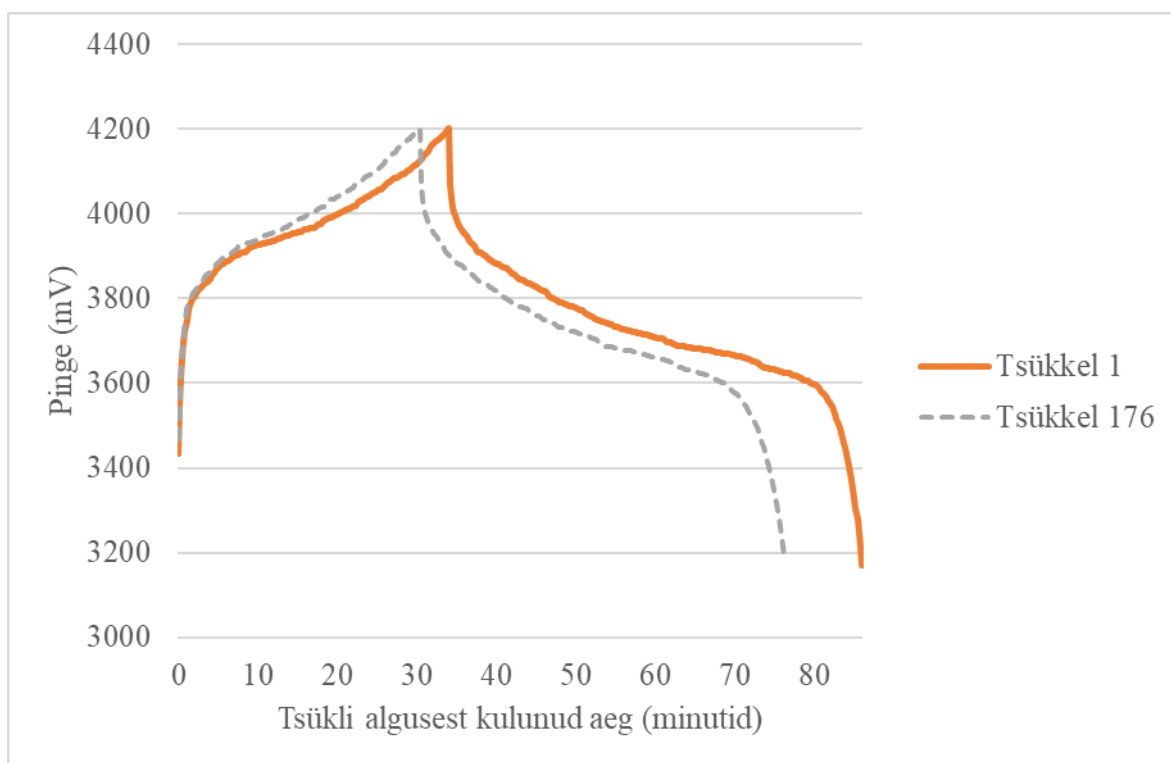
Et saada andmed analüüsivale kujule, tehti järgmised sammud.

1. Eemaldati vigased read. Osal ridadest oli pinge registreerimine ebaõnnestunud ning arvulise väärtuse asemel oli tekst „*connecting*“.
2. Lisati päeva identifikaatorid. Kuna andmefailis olid ainult kellaajad, aga mitte kuupäevad, siis lisati päeva järjekorranumber, alustades esimeste andmeridade juures päevast 1. Lisati ka kuupäev, kuna oli teada andmete lõpukuupäev.
3. Tuvastati, millal algas uus tsükkel. Tsükli alguseks loeti olukorda, kus seade lülitati tühjendamisrežiimilt ümber laadimisrežiimile. Tsüklid nummerdati alates andmefaili algusest. Esimene tsükkel oli andmetes poolikult, sellele anti järjekorranumber 0.
4. Tuvastati, millised read tähistavad laadimist ja millised tühjendamist.

Andmete ettevalmistus toimus tabelarvutusprogrammi Microsoft Excel abil.

### 4.3. Andmete analüüs

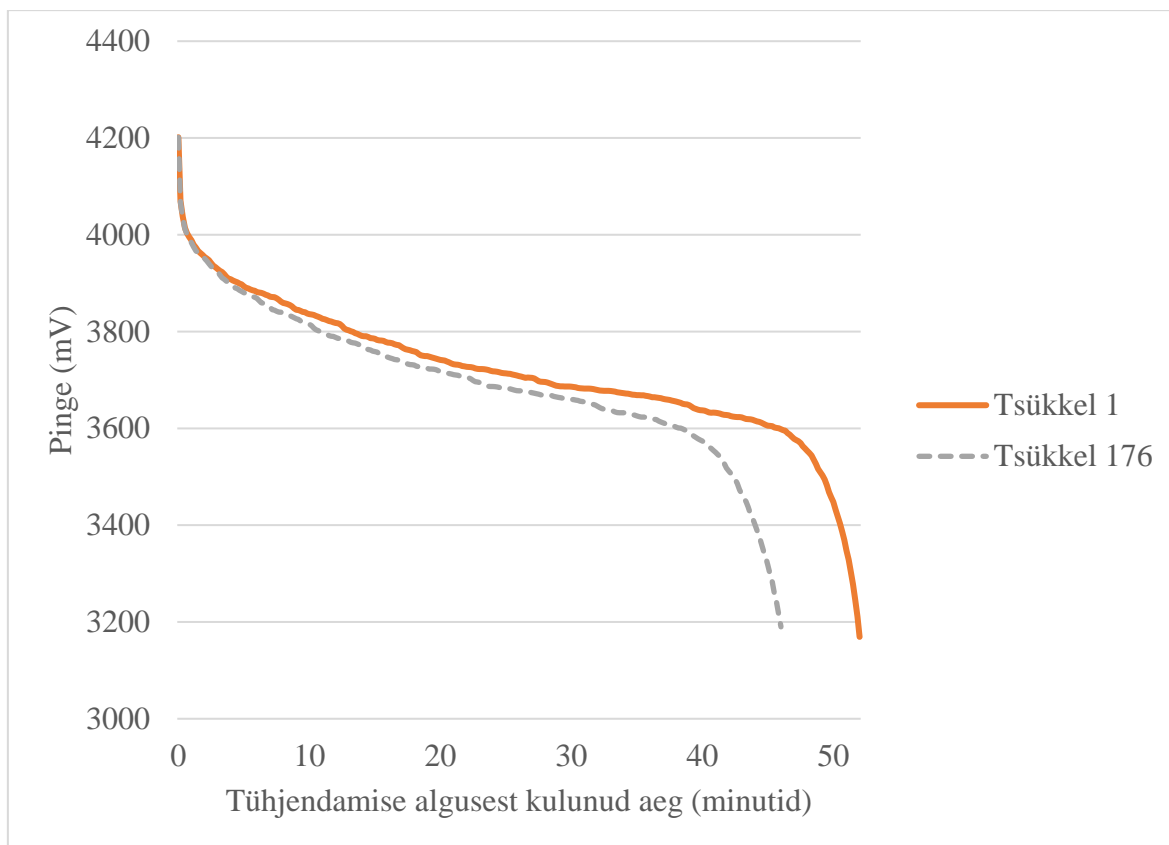
Kuna terviktsüklites laadimise ja tühjendamise tulemusena aku vananeb, siis esmajoones on oodatav, et andmetest on näha mahutavuse langust ning sisetakistuse kasvu. Joonis 4.3 näitab, kuidas muutus pinge esimese ja viimase laadimistsükli jooksul.



**Joonis 4.3.** Akuelemendi pinge muutus esimeses ja viimases laadimis-tühjendamistsüklis.

Viimane tsükkel kestis pisut üle 76 minuti, esimene 86 minutit, seega lühenemine on märgatav ja see puudutab nii laadimist kui ka tühjendamist.

Esimese ja viimase tsükli tühjendamisfaasi kirjeldab joonis 4.4.

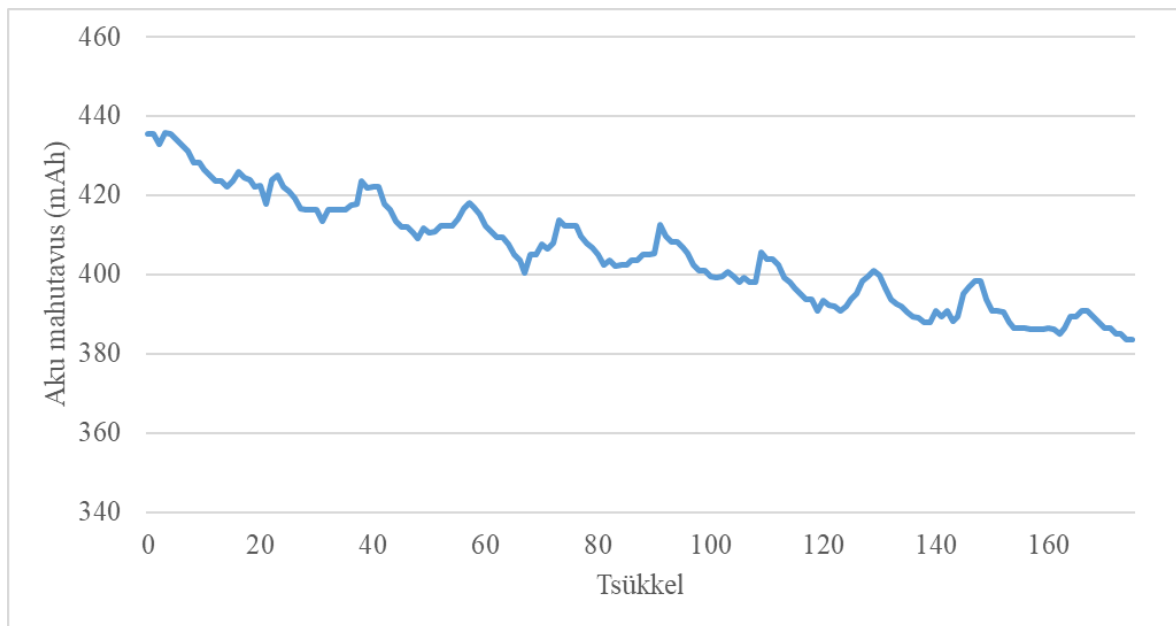


**Joonis 4.4.** Akuelemendi pinge muutus esimese ja viimase tsükli tühjendamisfaasis.

Esimese tsükli tühjendamisfaas kestis ligi 52 minutit, viimase tsükli tühjendamisfaas veidi alla 46 minuti. Jooniselt 4.4 on näha, et sama koormuse ja temperatuuri juures saab viimasel tsükli energia varem otsa, mis viitab mahutavuse vähenemisele. Lisaks toimub mõlemal juhul tsükli alguses pinge kiire langus ning seejärel on suurema osa tsüklist pinged ligilähedased – viimases tsükli on pinge ainult mõnekümne millivoldi võrra madalam kui esimeses. Pinge hakkab kiiresti langema ca 3,6-voldise väärtuse juures ning viimases tsükli saabub see hetk ca 8 minutit varem kui esimeses tsükli.

Tühjendamise käigus võeti akuelemendist välja kogu kasulik energia ja arvestati soovituslikku tühjendamismäära. See tähendab, et päris kogu energiat tühjendamise ajal akuelemendist välja ei võetud. Joonisel 4.5 on esitatud akust saadava energiahulga vähenemine tsüklite lõikes.

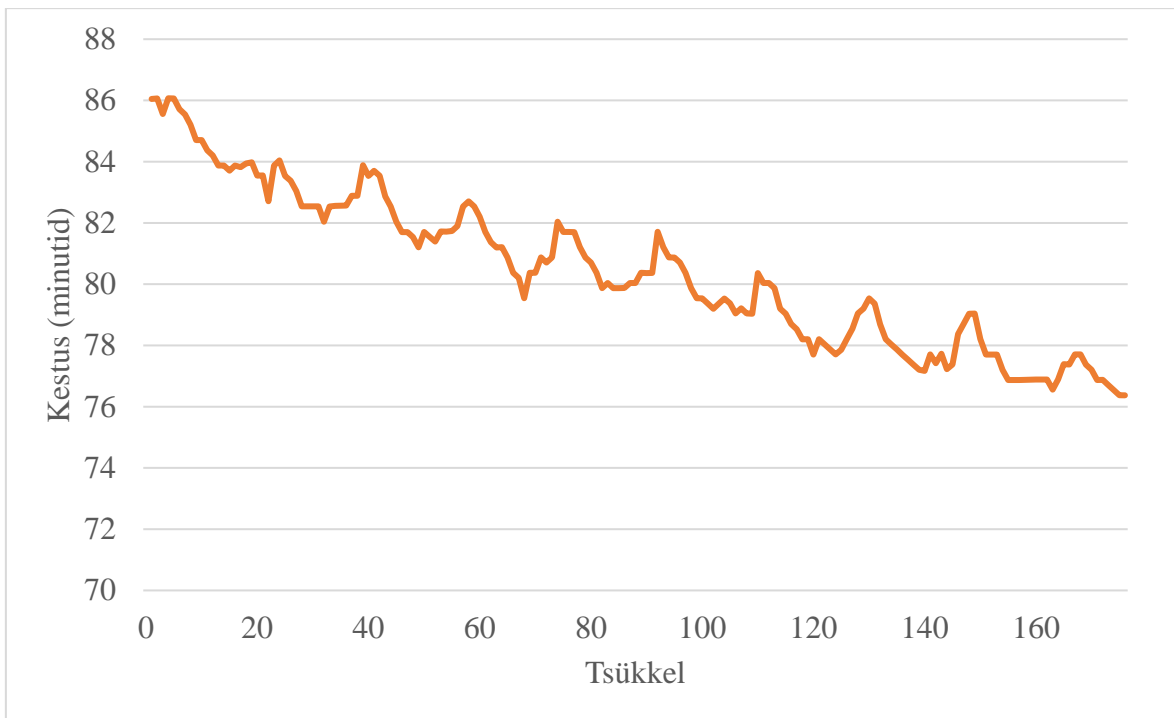




**Joonis 4.5.** Akuelemendi hinnanguline mahutavus tsüklite lõikes.

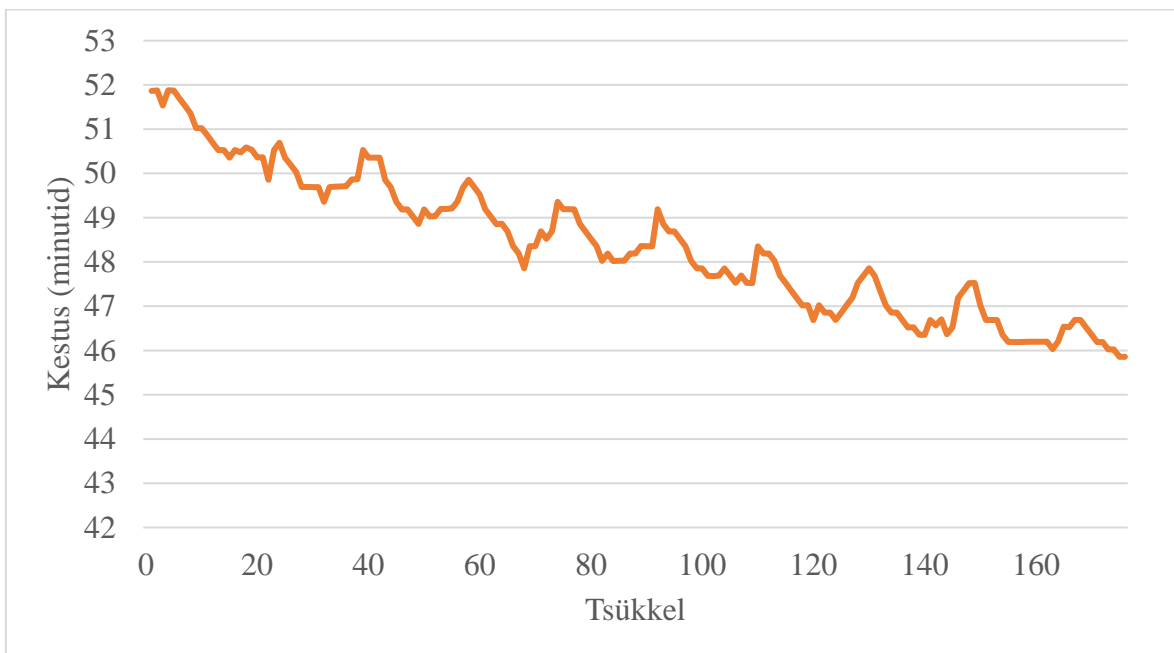
Joonis 4.5 ei kujuta tingimata akuelemendi kogumahutavust, kuid annab kahanemisest selge ülevaate. Ühtlasi on näha, et kui võtta akuelemendi eluea lõpuks olukord, kus algsest mahutavusest on järel alla 80%, siis see akuelement on eluea lõpus. Tootelehel [44] on lubatud tsüklite arvuks märgitud  $\geq 800$ . Akuelemendi nimimahutavus on 500 mAh, mis teeb 80% piiriks 400 mAh, ning see piir on vaadeldava 10-päevase perioodi jooksul ületatud.

Kui vaadelda tsüklite pikkust kogu 10-päevases ajavahemikus, siis on näha trend, et tsüklid lühenevad. Tsüklite lühenemine tuleneb peamiselt mahutavuse vähenemisest, kuid ka ilmselt sisetakistuse kasvust, mida näitab ka andmete perioodilisus: iga päeva õhtusel ajal, keskmiselt kella 19 paiku, on tsüklid pikemad võrreldes hommikusega, keskmiselt kella 7 paiku, kus on tsüklid lühemad. See puudutab taas nii laadimist kui ka tühjendamist. Arvatavalt on põhjuseks temperatuuri muutumine laboris – õhtul on laboris soojem ja hommikul jahedam. Temperatuuri tõus vähendab ajutiselt aku sisetakistust ja see muudab tsüklid pikemaks. Tsüklite pikkuste muutumist kogu 10-päevase perioodi jooksul esitab joonis 4.6.



**Joonis 4.6.** Laadimis-tühjendamistsüklite kestus tsüklite lõikes.

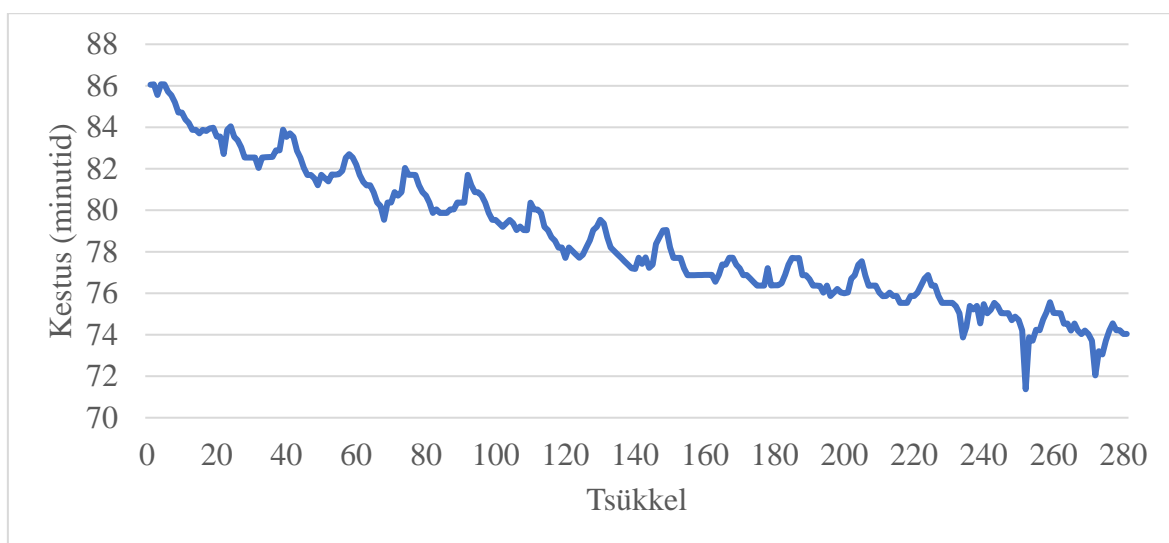
Kui vaadelda nendes 176 tsükliis ainult tühjendamisfaasi, siis on graafik sarnane eelmisega – joonis 4.7.



**Joonis 4.7.** Tühjendamisfaasi kestus tsüklite lõikes.

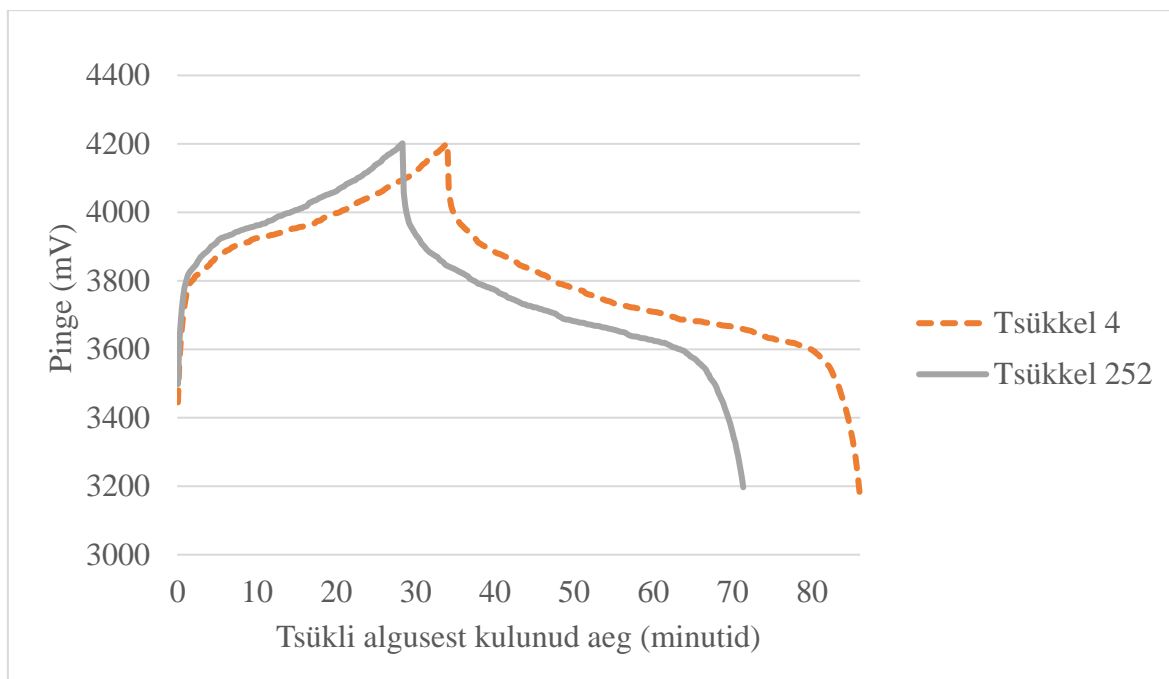
#### 4.4. Muutused tühjendamistsüklites akuelemendi eluea lõpus

Joonise 4.5 alusel tehti järeldus, et uuritud akuelement on oma eluea lõpus. Siin töös on peamiselt vaatluse all 10-päevane ajavahemik, kuid kui pikendada vaadeldavat vahemikku 15 päevani, on näha, et laadimiste kestuste graafikul toimub umbes 230. tsükli juures muutus, kus tsüklid muutuvad lühemaks ja graafiku kuju muutub – joonis 4.8.



**Joonis 4.8.** Laadimis-tühjendamistsüklite kestus tsüklite lõikes 15 päeva jooksul.

Aku eluea lõpus langeb mahutavus järsemalt [46] ja seega viitab ka sinne mahutavuse langemine alla 80% ning sellega kaasnev tsüklite kestuse graafiku muutus uuritud akuelemendi eluea lõpule. Samas on laadimis- ja tühjendamiskõverad sarnase kujuga nagu vaadeldud perioodi alguses, lühenenud on üksnes tsükli pikkus. Joonisel 4.9 on esitatud 15-päevase perioodi pikimat ja lühimat täistsüklit iseloomustavad kõverad.

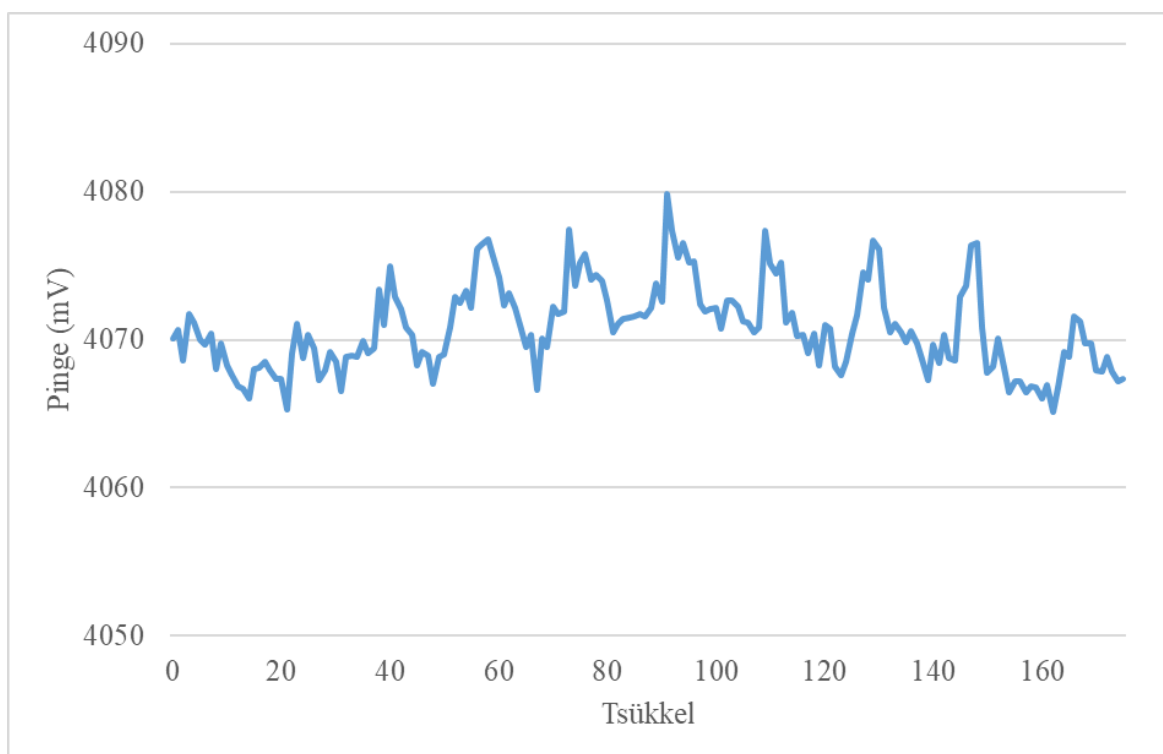


**Joonis 4.9.** Pinge muutus ajaliselt lühimas ja ajaliselt pikimas tsükli 15 päeva jooksul.

#### 4.5. Sisetakistuse tuletamine tühjendamisandmetest

Seame hüpoteesi, et iga tühjendamistsükli alguses toimuv pinge kiire vähenemine on seotud sisetakistusega ning kuna akuelemendi vananedes sisetakistus suureneb, siis annab tühjendamistsüklite alguses toimuv kiire pinge langus ettekujutuse sisetakistuse suurenemisest ja sellest tulenevalt akuelemendi terviseseisundi halvenemisest. Hüpoteesi järgi on parema seisundiga akuelemendi puhul pingelang tühjenemise alguses väiksem kui rohkem vananenud aku puhul.

Joonisel 4.10 on näidatud iga tühjendamistsükli alguses mõõdetud esimene pinge ehk selline väärtus, kuhu akuelemendi klemmipinge pärast laadimise lõppemist ja tühjenemise algust maksimumpingelt 4,2 V kiiresti langeb.



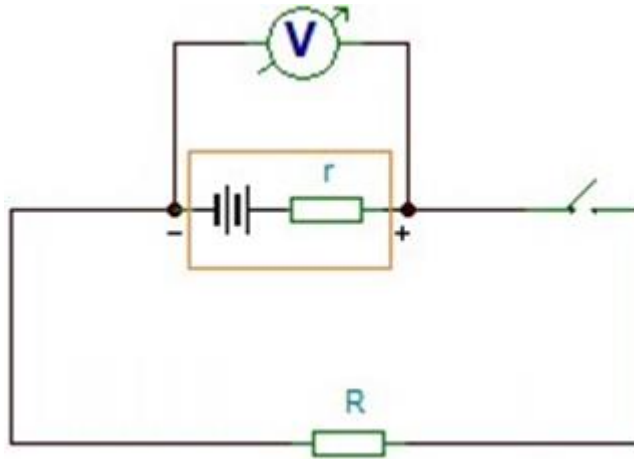
**Joonis 4.10.** Tühjendamistsüklite alguses mõõdetud esimene pingeline.

Jooniselt 4.10 ei paista pingeline vähenemistrendi, seega ei saa järeldada, et pingelang tühjendamise alguses oleks akuelemendi seisundi hindamiseks sobiv kriteerium. Visuaalselt oli see aimatav juba jooniselt 4.4. Joone kõikumine üles-alla on tingitud temperatuuri muutusest ööpäeva lõikes nagu mitmel eelmiselgi joonisel. Hüpotees ei leidnud kinnitust.

#### **4.6. Akuelemendi sisetakistuse määramine**

Eelmistes alampeatükkides vaadeldud vananemisandmetest ei tulnud välja seost akuelemendi vananemise ja sisetakistuse vahel. Seetõttu mõõdeti akuelemendi sisetakistust eraldi.

Tehtud mõõtmised olid sõltumatud eelnevalt vaadeldud laadimis- ja tühjendamistsüklitest. Uuriti teist akuelementi, mille nimiparameetrid olid samad nagu vananemisandmete saamiseks kasutatud akuelemendil (tabel 4.1). Sisetakistuse määramisel kasutatud skeem on joonisel 4.11.



**Joonis 4.11.** Sisetakistuse määramisel kasutatud skeem.

Sisetakistus arvutati valemiga

$$r = \frac{\varepsilon - U}{U} \cdot R \quad (4.1)$$

kus

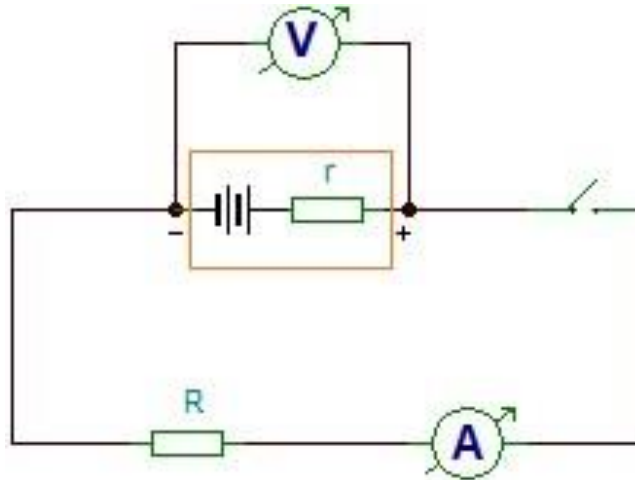
$r$  on otsitav sisetakistus ( $\Omega$ );

$\varepsilon$  on elektromotoorjõud (V), mis loetakse voltmeetrilt, kui lüliti skeemis on avatud;

$U$  on pinge (V), mis loetakse voltmeetrilt, kui lüliti skeemis on suletud;

$R = 8,2 \Omega$  on takisti väärtus.

Skeemi oleks võinud lisada ka ampermeetri – joonis 4.12.



**Joonis 4.12.** Sisetakistuse määramise skeem koos ampermeetriga

Kui vooluringis oleks olnud ampermeeter, oleks saanud sisetakistuse arvutamiseks kasutada ka valemit

$$r = \frac{\varepsilon - U}{I}, \quad (4.2)$$

kus  $I$  on voolutugevus, mis loetakse ampermeetrit, kui lüliti on suletud.

Lisaks sisetakistuse määramisele eelpool kirjeldatud viisil uuriti sama akuelemendi seisundit lühiskatsega. Lühiskatses ühendati multimeetri pluss-juhe suurt voolu (enamasti 10 A) taluvasse sisendisse ning lülitati multimeeter ampermeetri režiimi. Seejärel ühendati korraks multimeetri juhtmed otse akuelemendi klemmidele, ilma et vooluringis oleks jadamisi või rööbiti mingit muud komponenti ühendatud.

Kuna tekkiv voolutugevus võib olla suur ja võib kahjustada multimeetrit, samuti akuelement võib kuumeneda, siis saab sellise ühenduse teha ainult korraks ning multimeetri näit tuleb lugeda kiiresti. Multimeetrilt loetud väärtuse ning akuelemendi elektromotoorjõu alusel on võimalik leida akuelemendi sisetakistus ning võrrelda seda joonisel 4.11 toodud skeemi abil leitud sisetakistuse väärtusega.

Mõõtmisel kasutati multimeetrit UNI-T UT33C [47]. Mõõtmiste ajal oli ruumi õhutemperatuur 22 °C. Mõõtmistulemused on tabelis 4.2.

**Tabel 4.2.** Akuelemendi sisetakistuse leidmiseks tehtud mõõtmiste tulemused

Katse nr	Vool $I_L$ lühiskatses (A)	$\varepsilon$ (V)	U (V)
1	$13,40 \pm 0,15$	$3,81 \pm 0,04$	$3,64 \pm 0,04$
2	$13,30 \pm 0,15$	$3,84 \pm 0,04$	$3,65 \pm 0,04$
3	$13,35 \pm 0,15$	$3,82 \pm 0,04$	$3,63 \pm 0,04$
4	$12,90 \pm 0,15$	$3,81 \pm 0,04$	$3,60 \pm 0,04$
5	$12,77 \pm 0,15$	$3,79 \pm 0,04$	$3,61 \pm 0,04$
6	$12,97 \pm 0,15$	$3,80 \pm 0,04$	$3,58 \pm 0,04$
7	$13,22 \pm 0,15$	$3,79 \pm 0,04$	$3,59 \pm 0,04$
8	$12,93 \pm 0,15$	$3,78 \pm 0,04$	$3,60 \pm 0,04$
9	$12,64 \pm 0,15$	$3,78 \pm 0,04$	$3,60 \pm 0,04$
10	$12,86 \pm 0,15$	$3,79 \pm 0,04$	$3,57 \pm 0,04$

Kuna siin katses ei taotleta suurt täpsust, vaid uuritakse erinevust kahel viisil saadud sisetakistuse vahel, siis arvestatakse arvutustes mõõtmisel saadud näitude keskmisi:  $I_L = 13,03$  A;  $\varepsilon = 3,8$  V;  $U = 3,6$  V.

Sisetakistuse väärtuseks valemi 4.1 alusel on

$$r = \frac{\varepsilon - U}{U} \cdot R = \frac{3,8 - 3,6}{3,6} \cdot 8,2 \approx 456 \text{ m}\Omega$$

ning lühiskatse tulemusena valemist

$$r_L = \frac{\varepsilon}{I_L} \quad (4.3)$$

tuleb sisetakistuse väärtuseks

$$r_L = \frac{\varepsilon}{I_L} = \frac{3,8}{13,03} \approx 292 \text{ m}\Omega.$$

Tulemused  $r = 456 \text{ m}\Omega$  ning  $r_L = 292 \text{ m}\Omega$  on küllalt erinevad. Kuna kasutati väikest takistit ( $R = 8,2 \Omega$ ), võis tulemusi mõjutada juhtmete takistus. Lühiskatses oli multimeetri näidu võtmine raskendatud, kuna akuelementi ühendati multimeetriga ainult korraks ja näit tuli lugeda kiiresti (ca 1 sekund), kusjuures selle ajaga multimeetri näit ei stabiliseerunud. Saadud tulemused viitavad vananenud akuelemendile, korras akuelemendil võiks olla sisetakistus väiksem [48], kuid aktsepteeritav sisetakistuse väärtus sõltub konkreetse akuelemendi tüübist ja mudelist.



## 4.7. Järeldused

Võrdlemisi lihtsat andmestikust, mis on saadud akuelemendi järjestikustest laadimis- ja tühjendamistsüklitest ning kus iga 10 sekundi tagant on registreeritud akuelemendi klemmipinge, on võimalik näha aku vananemisele iseloomulikke muutusi. Andmete uurimisest tehti järgmised järeldused.

1. Vananemisandmetes oli selgelt näha tsüklite pikkuse vähenemine. Kirjanduse järgi on selline tulemus oodatav [49].
2. Vananemisandmete analüüs kinnitas, et välised tegurid mõjutavad katsetulemusi. Siin mõjutas labori temperatuur laadimis- ja tühjendamistsüklite pikkusi.
3. Vaadeldud akuelemendi pinge hakkab kiiresti langema, kui tühjendamisel jõuab pinge väärtuseni 3,6 V. Võib öelda, et uuritav akuelement pole pingega alla 3,6 V kasutatav.
4. Akuelemendi mahutavuse vähenemine on laadimis-tühjendamistsüklite andmetest välja loetav.
5. Akuelemendi klemmipinge kiire languse alusel tühjendamistsükli alguses ei saanud siin teha järeldusi aku sisetakistuse ega üldisemalt aku tervises seisundi kohta.
6. Sisetakistuse määramine lühiskatsel andis siin katses märgatavalt erinevaid tulemusi võrreldes sisetakistuse määramisega vooluringi ühendamata akuelemendi elektromotoorjõudu ning vooluringi ühendatud akuelemendi klemmipinget arvestades.
7. Katsetes kasutatud takistid olid nii väikesed, et tulemusi võis mõjutada juhtmete takistus.
8. Reaalsed olukorrad, kus elektriautode akusid kasutatakse (kõrged-madalad temperatuurid, ebahühtlane kasutus), erinevad siiski oluliselt laboritingimustest, seega võivad laboris saadud tulemused osutada reaalselt kasutuses olevat elektriautode akude seisundi hindamiseks ebapiisavaks.

Maaülikooli laborist saadud akuelemendi vananemisandmete analüüs oli lihtsam kui avalike aku vananemisandmete analüüs, kuna andmestik oli lihtsam ja oli hea ülevaade, kuidas ja millistes tingimustes andmeid saadi. Avalikud akude vananemisandmestikud võivad sisaldada rohkem parameetreid (nt temperatuur) ja nende juurde võib kuuluda mahukas

dokumentatsioon, kuid nendega töötamise käigus tekib küsimusi, millele selge vastuse leidmine on keerukam.

Tööl on mitmeid võimalikke edasiarendusi. Mõned nendest on järgmised.

1. Sisetakistust saab uurida täpsemalt: teha rohkem mõõtmisi erinevate akuelementidega eri laetuse taseme korral.
2. Akuelementide laadimis- ja tühjendamistsüklite pikkusi saab varieerida; laadida ja tühjendada võib osaliselt.
3. Vananemisandmete kogumisel saab varieerida keskkonna temperatuuri, milles seade akuelemente laeb-tühjendab. Ühtlasi võib tagada parema kontrolli temperatuuri üle, et hoida keskkonda samal temperatuuril – „kliimakamber“.
4. Laadimiste ja tühjendamiste vahele saab lisada puhkeajad.
5. Katseseadmele võib lisada funktsionaalsuse, et see määraks tsüklite vahel akuelemendi sisetakistuse. Nii saab paremini jälgida sisetakistuse muutumist laadimistsüklite jooksul.
6. Uuritavad akuelemendid võib ühendada kokku üheks akumooduliks ning uurida tervet moodulit korraga.

## KOKKUVÕTE

Töös vaadeldi elektriauto akude seisundi hindamise meetodeid. Mitmest aku seisundit iseloomustavast parameetrist on enim huvi pakkuv aku terviseseisund, mis iseloomustab aku omaduste halvenemist aja jooksul. Teiste parameetrite hulgas on aku järelejäänud kasulik eluiga, aga ka laetuse tase ning järelejäänud sõiduulatus.

Nimetatud parameetreid ei ole võimalik otse mõõta, vaid teiste parameetrite alusel hinnata. Oluline võimalikult täpsete hindamismeetodite väljatöötamine, et akude kasutust efektiivsemaks muuta ning paremini planeerida, samuti ohutust suurendada.

Tähtsamad aku terviseseisundiga korrelatsioonis olevad parameetrid on aku sisetakistus, mis aku vananedes suureneb, ja mahutavus, mis aku vananedes väheneb. Töös uuriti mõlemat parameetrit, kasutades Maaülikooli energiavarustuse laborist saadud akuelemendi vananemisandmeid ning määrates akuelemendi sisetakistust.

Vananemisandmete saamiseks oli akuelementi katseseadme abil järjest laetud ja tühjendatud ning see töö vaatles peamiselt 10-ööpäevast perioodi akuelemendi eluea lõpus. Andmetest oli välja loetav akude laadimistsükli lühenemine ning akuelemendi mahutavuse vähenemine vähem kui 80%-ni algsest mahutavusest, mida loetaksegi enamasti aku kasuliku eluea lõpuks. Töö eesmärk oli Maaülikooli energiavarustuse laboris tehtud katsete ja mõõtmiste tulemusena saadud akuelemendi vananemisandmete analüüs ja eesmärk sai täidetud.

Töö võimalikud edasiarendused on täiendavad akuelemendi sisetakistuse määramised eri akuelementide, eri laetuse taseme ja eri terviseseisundi korral ning vananemisandmete kogumise täiustamine, kus varieeritakse laadimis- ja tühjendamistsükleid – näiteks võib akuelementi laadida ja tühjendada osaliselt, uurida akuelemendi omadusi eri temperatuuridel ning eri tugevusega vooluga laadimisel ja tühjendamisel. Ühe akuelemendi uurimise asemel saab uurida mitmest elemendist koosnevat akupakki või -moodulit.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Nuroldayeva, G., Serik, Y., Adair, D., Uzakbaiuly, B., Bakenov, Z.** (2023) State of Health Estimation Methods for Lithium-Ion Batteries. International Journal of Energy Research. Volume 2023. [on-line] <https://www.hindawi.com/journals/ijer/2023/4297545/> (29.05.2024)
2. **Marri, I., Petkovski, E., Cristaldi, L., Faifer, M.** (2023) Comparing Machine Learning Strategies for SoH Estimation of Lithium-Ion Batteries Using a Feature-Based Approach. Energies 2023, 16, 4423. [on-line] <https://doi.org/10.3390/en16114423> (29.05.2024)
3. **Korkmaz, M.** (2023) SoC estimation of lithium-ion batteries based on machine learning techniques: A filtered approach. Journal of Energy Storage, Volume 72, Part A. [on-line] <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108268> (29.05.2024)
4. **Deng, Z., Lin, X., Cai, J., Hu, X.** (2022) Battery health estimation with degradation pattern recognition and transfer learning. Journal of Power Sources, Volume 525, 2022. [on-line] <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231027> (29.05.2024)
5. **Dong, Y., Chen, K., Zhang, G., Li, R.** (2024) Joint Estimation of State of Charge and State of Health of Lithium-Ion Batteries Based on Stacking Machine Learning Algorithm. World Electr. Veh. J. 2024, 15, 75. [on-line] <https://doi.org/10.3390/wevj15030075> (29.05.2024)
6. **Saha, B., Goebel, K.** (2007) Battery Data Set. NASA Prognostics Data Repository, NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA [on-line] <https://www.nasa.gov/intelligent-systems-division/discovery-and-systems-health/pcoe/pcoe-data-set-repository/> (29.05.2024)
7. **Vilsen, Søren B., Stroe, Daniel-Ioan** (2023) Lithium-ion battery degradation dataset based on a realistic forklift operation profile. Mendeley Data. [on-line] <https://data.mendeley.com/datasets/yz4pttm73n/2> (29.05.2024)
8. **Bills, A., Viswanathan, V., Sripad, S., Frank, E., Charles, D., Fredericks, W.** (2021) eVTOL Battery Dataset. Carnegie Mellon University. [on-line] [https://kithub.cmu.edu/articles/dataset/eVTOL\\_Battery\\_Dataset/14226830](https://kithub.cmu.edu/articles/dataset/eVTOL_Battery_Dataset/14226830) (29.05.2024)
9. NASA. Randomized and Recommissioned Battery Dataset [on-line] <https://catalog.data.gov/dataset/randomized-and-recommissioned-battery-dataset> (29.05.2024)
10. **Cui, X., Khan, M., Onori, S., Pozzato, G., Singh, S., Sharma, R.** (2024) Stanford-Relyion Second-Life Li-ion Battery Dataset. [on-line] <https://osf.io/fns57/> (29.05.2024)
11. **Rashid, M., Sheikh, M., Sansom, J., Niri, M., Marco, J.** (2023) DIB\_Data. [on-line] <https://data.mendeley.com/datasets/mn9fb7xdx6/3> (29.05.2024)

12. Esmito Solutions Pvt. Ltd. Thermal Management System in Electric Vehicles [*on-line*] <https://medium.com/@esmitoweb/thermal-management-system-in-electric-vehicles-esmito-c386a0222a69> (29.05.2024)
13. Driivz. What's Happening in EV Battery Technology. [*on-line*] <https://driivz.com/blog/ev-battery-technology/> (29.05.2024)
14. Electrification Coalition. Charging Infrastructure Week: Battery Technology. [*on-line*] <https://electrificationcoalition.org/charging-infrastructure-week-battery-technology/> (29.05.2024)
15. NMC and LFP Lithium-ion Batteries. [*on-line*] <https://www.ev-bee.com/article/9-nmc-and-lfp-lithium-ion-batteries> (29.05.2024)
16. NMC vs LFP: safety and performance in operation. [*on-line*] <https://powerup-technology.com/nmc-vs-lfp-safety-and-performance-in-operation> (29.05.2024)
17. LiFePO4 Battery Operating Temperature Range: Safety, Precautions, And Common Mistakes. [*on-line*] <https://ecotreelithium.co.uk/news/lithium-iron-phosphate-battery-operating-temperature-range/> (29.05.2024)
18. Growatt. LFP VS. NMC Battery: Which One is the Better Option? [*on-line*] <https://growattportable.com/blogs/news/lfp-vs-nmc-battery> (29.05.2024)
19. Mayfield Renewables. Comparing NMC and LFP Lithium-Ion Batteries for C&I Applications. [*on-line*] <https://www.mayfield.energy/technical-articles/comparing-nmc-and-lfp-lithium-ion-batteries-for-ci-applications/> (29.05.2024)
20. Lithium NMC Vs LiFePO4 – How To Choose The Best One For Your Needs [*on-line*] <https://ecotreelithium.co.uk/news/lithium-nmc-vs-lifepo4/> (29.05.2024)
21. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI. Analysis of global battery production: production locations and quantities of cells with LFP and NMC/NCA cathode material [*on-line*] <https://www.isi.fraunhofer.de/en/blog/themen/batterie-update/globale-batterieproduktion-analyse-standorte-mengen-zellen-lfp-nmc-nca-kathoden.html> (29.05.2024)
22. BloombergNEF. Lithium-Ion Battery Pack Prices Hit Record Low of \$139/kWh [*on-line*] <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/> (29.05.2024)
23. Visualized: What is the cost of electric vehicle batteries? [*on-line*] <https://www.mining.com/web/visualized-what-is-the-cost-of-electric-vehicle-batteries/> (29.05.2024)
24. **Khan, Rasul, Sayem, Mandal.** (2023) Maximizing energy density of lithium-ion batteries for electric vehicles: A critical review. Energy Reports, Volume 9, Supplement 11, 2023. Pages 11-21. [*on-line*] <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.08.069> (29.05.2024)
25. Tesla LFP Model 3. [veebileht] <https://www.batterydesign.net/tesla-lfp-model-3/> (29.05.2024)

26. Electric Vehicle Database. Tesla Model 3. [on-line] <https://ev-database.org/car/1991/Tesla-Model-3> (29.05.2024)
27. **Ma et al.** (2021) The 2021 battery technology roadmap. Journal of Physics D: Applied Physics [on-line] <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/abd353> (29.05.2024)
28. Enefit Volt. Elektriauto avalik laadimine. [veebileht] <https://enefitvolt.com/elektriauto-avalik-laadimine> (29.05.2024)
29. **Hough, B.** (2023) Full Speed Ahead: EV Study Reveals Impacts of Fast Charging [on-line] <https://www.recurrentauto.com/research/impacts-of-fast-charging> (29.05.2024)
30. **Arifin, N.** (2023) The Lifespan Of EV Battery : Mileage and Time Frame Considerations [on-line] <https://www.linkedin.com/pulse/lifespan-ev-battery-mileage-time-frame-considerations-arifin-mba> (29.05.2024)
31. Myth or Fact: Lithium-ion Batteries Self-Discharge After Being Fully Charged. [on-line] <https://www.dnkpowers.com/myth-or-fact-lithium-ion-batteries-self-discharge/> (29.05.2024)
32. Monta. See how temperature affects the range of your EV [on-line] <https://monta.com/uk/blog/how-temperature-affects-ev-range/> (29.05.2024)
33. **Kampker, A., Heimes, H., Ordnung, M., Lienemann, C., Hollah, A., Sarovic, N.** (2016) Evaluation of a Remanufacturing for Lithium Ion Batteries from Electric Cars. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering Vol:10, No:12, 2016. [on-line] <https://publications.waset.org/10006102/evaluation-of-a-remanufacturing-for-lithium-ion-batteries-from-electric-cars> (29.05.2024)
34. **Bellantuono, J.** How High-Voltage Batteries are Enabling Electrification in New Markets [on-line] <https://www.dynamicmanufacturinginc.com/how-high-voltage-batteries-are-enabling-electrification-in-new-markets/> (29.05.2024)
35. What is a Battery Management System. [veebileht] <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-a-battery-management-system.html> (29.05.2024)
36. **Khan, A.** What is Cell Balancing? [on-line] <https://intellipaat.com/blog/cell-balancing/> (29.05.2024)
37. Why is it Important to Measure Battery's Internal Resistance? [on-line] <https://www.hioki.com/euro-en/learning/electricity/internal-resistance.html> (29.05.2024)
38. **Park, S., Ahn, J., Kang, T., Park, S., Kim, Y., Cho, I., Kim, J.** (2020). Review of state-of-the-art battery state estimation technologies for battery management systems of stationary energy storage systems. Journal of Power Electronics. 20. 10.1007/s43236-020-00122-7. [on-line] [https://www.researchgate.net/publication/343484165\\_Review\\_of\\_state-of-the-art\\_battery\\_state\\_estimation\\_technologies\\_for\\_battery\\_management\\_systems\\_of\\_stationary\\_energy\\_storage\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/343484165_Review_of_state-of-the-art_battery_state_estimation_technologies_for_battery_management_systems_of_stationary_energy_storage_systems) (29.05.2024)

39. ElectronicDesign. Measuring ACIR of Lihtium-Ion Cells. [on-line] <https://www.electronicdesign.com/technologies/test-measurement/article/21246713/keysight-technologies-measuring-acir-of-lithium-ion-cells> (29.05.2024)
40. **Brorein, Ed.** A Deeper Look at Lithium-Ion Cell Internal Resistance Measurements [on-line] <https://www.keysight.com/blogs/en/tech/bench/2022/05/31/a-deeper-look-at-lithium-ion-cell-internal-resistance-measurements> (29.05.2024)
41. **An, C., Wang, S., Lin, L., Ding, X., Deng, Q., Hu, N.** (2024) Construction and ultrasonic inspection of the high-capacity Li-ion battery based on the MnO<sub>2</sub> decorated by Au nanoparticles anode. Microstructures. [on-line] <https://www.oaepublish.com/articles/microstructures.2023.64> (29.05.2024)
42. **Brown, S.** Machine learning, explained. [on-line] <https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/machine-learning-explained> (29.05.2024)
43. **Pungas, T.** Masinõpe: mittetehniline ülevaade [veebileht] <https://pungas.ee/masinope-mittetehniline-ulevaade/> (29.05.2024)
44. LNC Batteries. 13350 3.7v 500mah 1.85wh lipo battery [veebileht] <https://lncibattery.com/product/13350-3-7v-500mah-1-85wh-lipo-battery/> (29.05.2024)
45. **Tharad, V.** Lithium Polymer Battery Working & Characteristics. [veebileht] <https://www.linkedin.com/pulse/lithium-polymer-battery-working-characteristics-vijay-tharad-plj6c/> (29.05.2024)
46. **Yang, X-G., Leng, Y., Zhang, G., Ge, S., Wang, C-Y.** (2017) Modeling of lithium plating induced aging of lithium-ion batteries: Transition from linear to nonlinear aging. Journal of Power Sources. Volume 360. Pages 28-40. ISSN 0378-7753 [on-line] <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.05.110> (29.05.2024)
47. Digital Multimeter UT33C UNI-T. [veebileht] <https://www.tme.eu/en/details/ut33c/portable-digital-multimeters/uni-t/> (29.05.2024)
48. What Internal Resistance Tells Us About Battery Health and How to Measure it [on-line] <https://www.xtar.cc/news/what-internal-resistance-tells-us-about-battery-health-and-how-to-measure-it-261.html> (29.05.2024)
49. **Han, X., Feng, X., Ouyang, M. et al.** (2019) A Comparative Study of Charging Voltage Curve Analysis and State of Health Estimation of Lithium-ion Batteries in Electric Vehicle. Automot. Innov. 2, 263–275. [on-line] <https://doi.org/10.1007/s42154-019-00080-2> (29.05.2024)

**LISAD**



