



Maiko Mägi

TUDENGIVORMELI FEST 24 AKUMUDEL

LÕPUTÖÖ

Tehnikainstituut

Autotehnika õppekava

Juhendaja: Kaido Hiieleek

Tallinn 2024

Autori deklaratsioon ja lihtlitsents

Mina/meie, Maiko Mägi, tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendaja Kaido Hiieleek

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Maiko Mägi

sünnikuupäev: 08.04.2000

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Tudengivormeli FEST24 akumudel

1. reprodutseerimiseks paberkandjal kõrgkooli raamatukogus avaldamise ja säilitamise eesmärgil;
2. elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu;
3. kui lõputöö avaldamisele on instituudi direktori korraldusega kehtestatud tähtajaline piirang, lõputöö avaldada pärast piirangu lõppemist.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et:

1. lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi;
2. PDF-failina esitatud töö vastab täielikult kirjalikult esitatud tööle.

Tallinnas, allkirjastatud digitaalselt

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	5
1 LIITIUM-IOON ELEMENT.....	6
1.1 Liitium-ioon elemendi omadused.....	6
1.2 Liitium-ioon elemendi sisemine ehitus.....	9
2 ELEMENDI MUDEL	12
2.1 Aku elemendi mudelid.....	12
2.2 Thevenin mudel	13
2.3 Aku elementide testimine	14
2.4 Ekvivalent mudeli takistuste ja mahutavuste leidmine.....	16
2.5 Valideerimine	18
3 AKUHALDUSSÜSTEEMI MUDELI KOOSTAMINE	21
3.1 Akupaki mudeli ülesehitus	22
3.2 Laetustaseme arvutamise funktsioon.....	23
3.2.1 Laetustaseme arvutamise meetodid	24
3.2.2 Kalman filter	25
3.3 Elementide balansseerimise funktsioon	27
3.4 Vea tuvastuse funktsioon.....	28
3.5 Lonkav režiimi funktsioon.....	31
3.6 Jahutus kontroll funktsioon	33
4 FEST 24 AKUHALDUSSÜSTEEMILE KOODI KIRJUTAMINE	35
4.1 Akuhaldussüsteemi topoloogiad.....	35
4.2 Nõuded.....	36
4.3 Akuhaldussüsteemi kood.....	38
KOKKUVÕTE.....	39
SUMMARY	40
VIIDATUD ALLIKAD.....	41
LISAD	42
Lisa 1. 3 Sigma sorteerimine.....	43
Lisa 2. Mudeli võrdlus Itaalia võistluste kestvussõiduga.....	44
Lisa 3. Mudeli võrdlus FSG võistluse kestvussõiduga	45
Lisa 4 Kalman filtri sisend pinged ning väljund laetustasemed ja allesjäänud mahutavus.....	46
Lisa 5. Elementide balansseerimine mudelis	47

Lisa 6. Akuhaldussüsteemi ülesehitus.....	48
---	----

SISSEJUHATUS

Maailmas aina suurenev nõudlus limiteeritud fossiil kütuste järgi ja kasvav CO₂ jalajälg on pannud inimkonda otsima alternatiivseid energia ja energia hoiustamis meetodeid. Transpordis on muutunud viimasel aastakümnel populaarseks hübriid ja täis elektrilised sõidukid. [1]

Seetõttu sai lõputöö teemaks valitud Tudengivormeli FS Team Tallinn FEST 24 akuhaldus süsteemi mudeli koostamine. Akumudelit on tarvis erinevate akupaki alam süsteemide projekteerimis sisendite saamiseks. Mudeli ehitamiseks kasutatakse Matlabi keskkonda. Antud keskkonnas saab kasutada Simscape ja Simulinki rakendusi paralleelselt akuhaldus süsteemi mudeli koostamiseks. Simscapes koostatakse aku elemendi mudel vastavalt reaalselt testitud elemendi andmetele. Testi andmete kaudu saab leida aku elemendi parameetrid. Tänu täpsele aku elemendi mudelile saab alustada akuhaldus süsteemi mudeli loomist. Tuleb luua vastavalt akupaki konfiguratsioonile akupaki mudel. Peale seda saab hakata lisama Simulinkis akupaki mudelile erinevaid akuhaldus funktsioone. Peamine eesmärk on saavutada täpne aku elemendi laetus taseme hindamine, et kasutada FEST24 akupaki maksimaalset mahutavust efektiivselt ära. Lisaks tuleb veel juurde lisada erinevaid funktsioone, mis tagaks ohutu aku paki haldussüsteemi töö. Lõpuks tuleks kirjutada kood FEST 24 akuhaldus süsteemile.

Tudengivormeli võistlussari on alguse saanud 1981. aastal USA-st. Tegemist on tootearendusvõistlusega, mille eesmärgiks on populariseerida inseneeriat ja arendada noori insenere. Hooaja pikkuseks on 1 aasta, mille käigus ehitatakse valmis täiselektriline võidusõidu vormel. Sinna hulka kuulub projekteerimine, tootmine, testimine ja võistlemine. Võistlustel osalevad erinevate ülikoolide meeskonnad igast maailma otsast. [2]

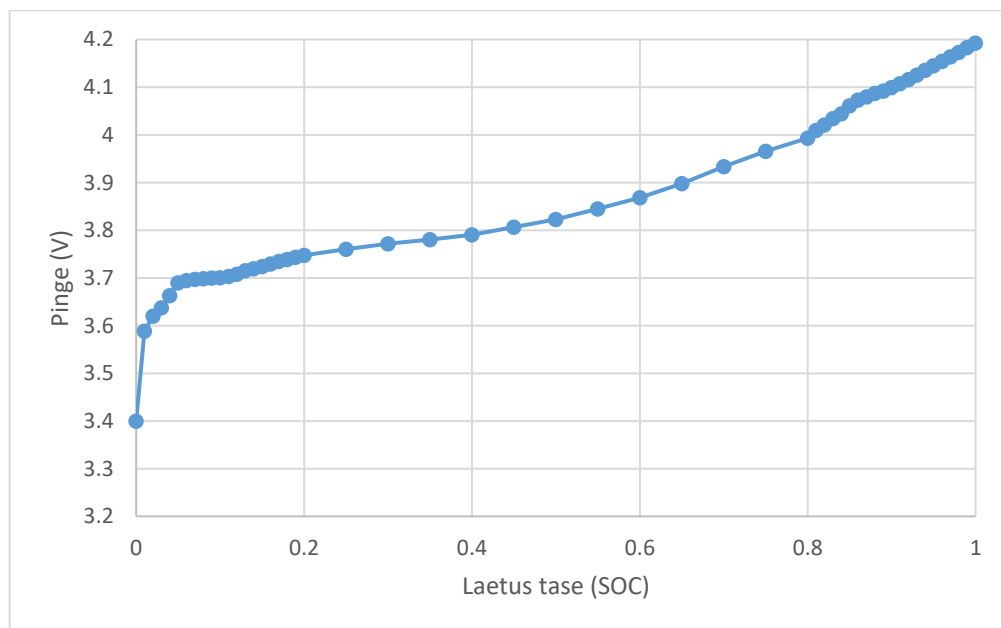
FS Team Tallinna meeskond on asustatud aastal 2006. Meeskond koosneb bakalaureuse- ja magistritudengitest, kes õpivad Tallinna Tehnika kõrgkoolis või Taltechis. Aastal 2008 ehitati valmis tiimi esimene sisepõlemismootoriga vormel ja aastal 2013 esimene täiselektriline vormel. Aastal 2019 alustati isesõitva vormeli arendusega. Praeguseks ehitame 12. elektrivormelit kuhu on integreeritud ka isesõitev süsteem. [3]

1 LIITIUM-IOON ELEMENT

Liitium-ioon element on keemiline seade, mis on loodud salvestama elektrilist energiat. Liitium-ioon elemente on erinevate kasutustingimuste jaoks erinevate parameetrite, sisemise ehituse ja korpustega. [4]

1.1 Liitium-ioon elemendi omadused

Pinge näitab elemendi elektrilist survet. Pinget mõõdetakse voltides. Liitium-ioon elementide tavaline nominaal pinge on 3.7 V. Oluline on hoida elementi oma töö vahemikus. Tavaliselt on liitium-ioon elementidel töövahemik 3 – 4.2 V. Liitium-ioon elemendid on stabiilsed oma nominaal pinge juures, aga ebastabiilsed oma töövahemike alam ja ülem piiri lähedal. (Joonis 1) Elemendi laadimisel üle ülem piiri saab element sisemisi kahjustusi ja võib liigsel kuumenemisel põlema süttida. Elemendi alla alampiiri laadides saab element samuti sisemisi kahjustusi. [4]



Joonis 1. Elemendi pinge VS laetus tase

Vool näitab elemendi elektrilist vooluhulka. Voolu mõõdetakse amprites. Liitium-ioon elementidel on vooluhulk seoses elemendi mahutavusega. Elemendi maksimaalset täis- ja tühjaks laadimis voolu näidatakse C-määrana. Liiga suure vooluga elemendi täis- ja tühjaks laadimine põhjustab elemendi kiirenenud vananemise. Samuti võib tekitada liigne koormamine jäädavaid kahjustusi elemendile või tekitada termilise ärajooksu. [4]

Võimsust mõõdetakse vattides. Selleks, et leida elemendi väljundi võimsus tuleb väljund vool korrutada läbi elemendi hetke pingega. Näiteks elemendi pinget on 3.9 volti ja väljund vool samal ajal 10 amprit siis väljund võimsus on $3.9 \text{ V} * 10 \text{ A} = 39 \text{ W}$. [4]

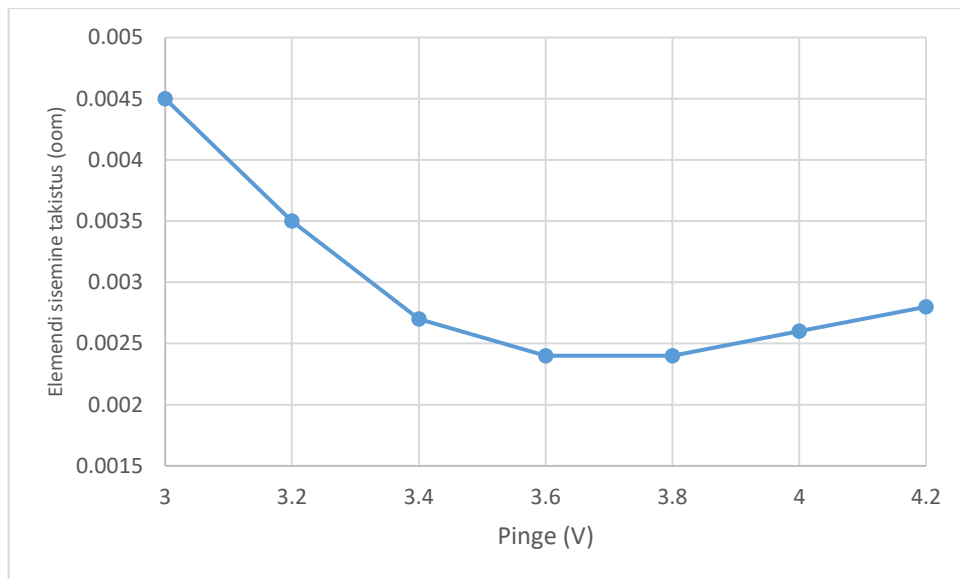
Mahutavus näitab kauaks jagub elemendil vooluhulka. Mahutavust mõõdetakse ampertundides. Elementi mille mahutavus on 3 Ah, saab tühjaks laadida 3 A vooluga tund aega. Lisaks ampertundidele mõõdetakse elemendi mahutavust vatt tundides. Vatt tunnid näitavad, mis võimsusega saab elementi tühjaks laadida tund aega. Elemendi mahutavuse leidmiseks vatt tundides tuleb nominaal mahutavus ampertundides korrutada läbi nominaal pingega. $3 \text{ Ah} * 3.7 \text{ V} = 11.1 \text{ Wh}$. [4]

C-määr (C-rate) näitab, kui aktiivselt element töötab. Enamjaolt on elementidel täis- ja tühjaks laadimise C-määr erinev. C-määr on seoses elemendi mahutavusega. Juhul kui elemendi mahutavus on 3 Ah ja tühjaks laadimise C-määr 10 siis maksimaalne tühjaks laadimise vool elemendile on $3 * 10 = 30 \text{ A}$. Samuti saab leida ka aja kaua saab elementi koormata 10 C-ga. Selleks tuleb jagada tund C-määraga. $60 \text{ minutit} / 10 \text{ C} = 6 \text{ minutit}$. (Tabel 1) [4]

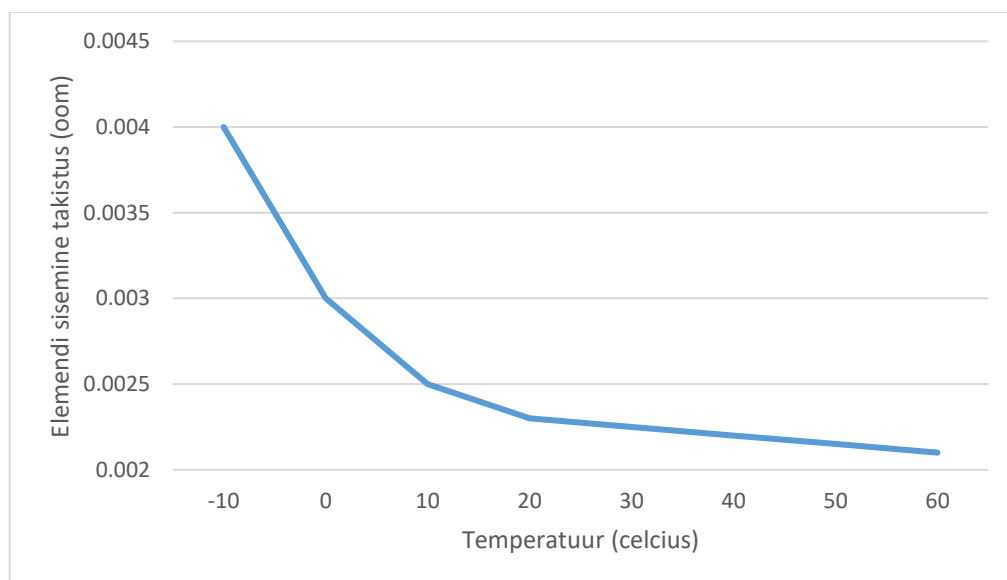
Tabel 1 C-määr, Vool ja Tööaeg

Mahutavus (Ah)	C-määr ja vool				C-määr ja tööaeg			
	0.5	1	3	6	0.5	1	3	6
0.8	0.4A	0.8A	2.4A	4.8A	120min	60min	20min	10min
3	1.5A	3A	9A	18A	120min	60min	20min	10min
12	6A	12A	36A	72A	120min	60min	20min	10min

Sisetakistus näitab elemendi elektrilist takistust. Elemendi sisemist takistust mõõdetakse milliohmides ja on varieeruv elemendi pinget jooksul. Pinget alampiiri juures tõuseb elemendi sisemine takistus kiirelt. (Joonis 2) Tänu elemendi sisemisele takistusele genereerib element eralduvat võimsust. Eralduva võimsuse valem on $I * R^2$. Lisaks on sisemine takistus ka seoses elemendi temperatuuriga. Elemendi temperatuuri tõusuga väheneb elemendi sisemine takistus. (Joonis 3) Selle tõttu väga raske leida elemendi sisemist takistust. [4]



Joonis 2. Elemendi sisemine takistus VS pinget



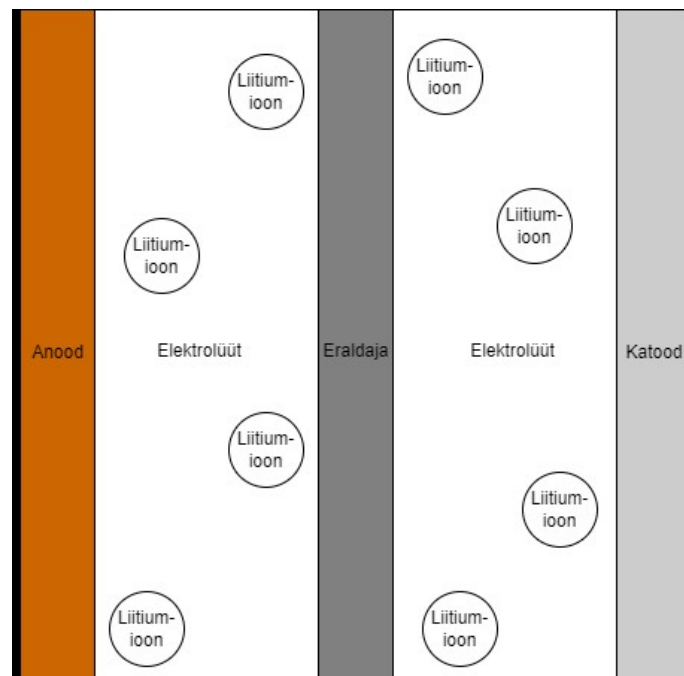
Joonis 3. Sisemine takistus VS temperatuur

Laetus tase (SOC) näitab elemendis järel olevat energia kogust. Elemendi laetus tase on seoses elemendi avatud ahela pingega. (Joonis 1) Mida dünaamilisem on koormus profiil seda keerulisem on leida elemendi laetus taset dünaamilise koormamise ajal. [4]

Eluiga (SOH) mõõdetakse täis- ja tühjaks laadimis tsüklites. Heades kasutus tingimustes võib elemendi eluiga olla üle 250 tsükli. Elemendi eluea lõpuks loetakse, kui elemendi mahutavus on vähenenud 80%-ni. Elemendi eluiga on tugevalt seoses tema kasutamise tingimustest. Selle tõttu võib olla väga keeruline, elemendi eluea hindamine. [4]

1.2 Liitium-ioon elemendi sisemine ehitus

Liitium-ioon elemendid on sarnased oma ülesehituselt plii-happe, nikkel-kaadmium ja nikkelmetallhüdriid elementidele. Liitium-ioon element koosneb kahest elektroodist, mis on uputatud elektrolüüdi sisse. Katood on elemendi negatiivne terminal ja anood positiivne. Elemendi koormamisel liiguvad liitium ioonid katoodi ja anoodi vahel mööda elektrolüüti. Elektronid liiguvad mööda elektroode tekitades voolu. Elektroodid on omavahel eraldatud poorse dielektrilise kilega mida nimetatakse eraldajaks. Kile hoiab ära elektroodide füüsilise kontakti, aga laseb ioonidel liikuda ühelt elektroodilt teisele. Liitium ionide liikumisel anoodilt katoodile toimub elemendi tühjaks laadimine ja ionide liikumisel katoodilt anoodile toimub elemendi täis laadimine. (Joonis 4) [5]

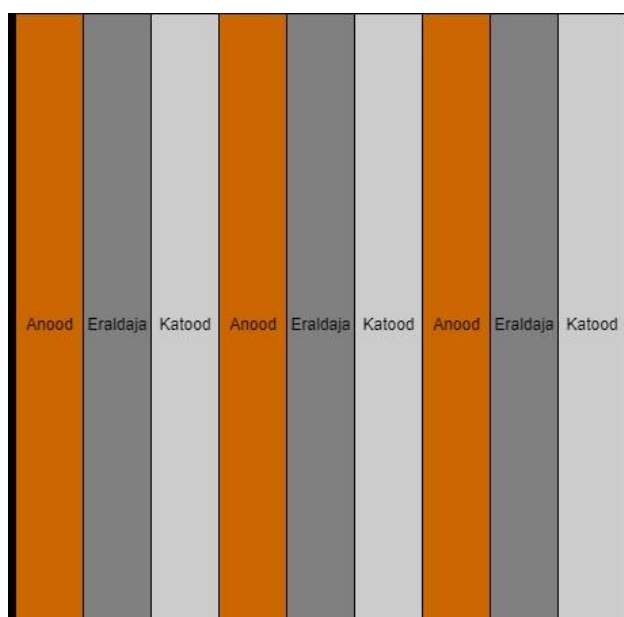


Joonis 4 Elemendi sisene ehitus

Anood on tavaliselt vaskleht, mis on kaetud aktiivmaterjaliga. Aktiivmaterjaliks enamjaolt on süsiniku pulbri ja polümeeri sideaine segu. Süsiniku pulber aitab liitium ioonidel liikuda anoodile ja polümeeri sideaine aitab hoida süsiniku pulbrit anoodil. Kuna aktiivmaterjali takistus on suurem kui vasel on oluline, et aktiivmaterjali kiht oleks võimalikult õhuke. Elemendi tühjaks laadimisel alla selle töövahemiku hakkab elemendi vask terminaalist eraldama sadet anoodi ja katoodi vahele. Pika ajalisel alapingega elemendil suureneb sisemine takistus ja võivad tekkida sillad anoodi ja katoodi vahele, mis võivad tekitada elemendi sisemise lühise. [5]

Katood on tavaliselt alumiiniumleht, mis on kaetud aktiivmaterjaliga. Aktiivmaterjaliks kasutatakse enamasti liitiummetalloksiidi või fosfaadipulbrit. Omakorda on materjal segatud polümeersideainega, et saavutada mehaaniline stabiilsus ja süsiniku pulbriga elektrilise juhtivuse parandamiseks. Erinevate katoodi materjalidega saab muuta elemendi omadusi nagu nominaal pinge, energia tihedus, eluiga ja termiline stabiilsus. [5]

Elemendi sisemise takistuse vähendamiseks ja maksimaalse voolu suurendamiseks on anood ja katood volditud omavahel kihiti. (Joonis 5) Suurendades anoodi ja katoodi pindala, muutub liitium-ioonide liikumine kergemaks elektrodide vahel. See tähendab, et elemendi maksimaalne vool ja pinge lang/tõus on seoses ionide liikumise kiirusega. [5]



Joonis 5 Elemendi kihid

Eraldaja on tavaliselt elastne plastikkile või klaasfiiberkangas. Eraldaja põhiülesandeks on elektrodide elektriline isoleerimine ja liitium-ioonide läbilaskmine. Eraldaja ei salvesta endasse laenguid. Seetõttu on oluline, et eraldaja kiht oleks võimalikult kerge ja õhuke. Oluline on samuti, et ei tekiks kohti, kus liitium-ioonidel oleks kergem liikuda, kuna see tekitab kuum punkte elemendis. See võib viia elemendi kiire isetühjaks laadimiseni, mis omakorda võib viia termilise ärajooksuni. [5]

Elektrolüüt on tavaliselt liitiumisool lahustatud orgaanilises aines. Elektrolüüdi termodünaamiline ebastabiilsus tekitab elektrolüüdi lagunemist. See omakorda lisab paksust elektrodidele, mis suurendab elemendi sisemist takistust kasutustsüklite ja vananemise jooksul. Samuti muutub

elektrolüüt ebastabiilseks ülelaadimise puhul. Element hakkab ülelaadimise puhul eraldama gaase, mis suurendab elemendi sisemist takistust ja kahjustab elemente jäädavalt. [5]

2 ELEMENDI MUDEL

Liitium-ioon elemendid on potentsiaalne energia hoiustamis võimalus hübriid- ja täiselektriliste sõidukite jaoks. Liitium-ioon elemendid on kõrge energia tiheduse, pika eluea ja madala isetühjenemisega. Liitium-ioon elementide integreerimine hübriid ja täiselektrilistele sõidukitele vajab dünaamilist akuhaldus süsteemi, mis hindaks aku võimekust erinevate keskkonna parameetrite juures. Samuti aitab akuhaldus süsteem optimeerida energia kasutust ja pikendada aku eluiga. Et see kõik võimalik oleks on vaja elemendi mudelit. [1]

2.1 Aku elemendi mudelid

Elemendi mudeli koostamiseks on palju erineva keerukusega tehnikaid. Kolm enim levinumat elemendi mudelit on elektrokeemilised, matemaatilised ja vooluringipõhised akumudelid.

Elektrokeemilised mudelid on tuletatud poorse elektroodi teooria järgi. Elektrokeemilise mudeliga saab täpselt ennustada aku võimekust, aga nõuab elektrokeemiliste protsesside ja algebraliste võrrandite mõistmist. Mudeli koostamine on väga keeruline ja arvutuslikult aeganõudev. Selle tõttu ei saa antud mudelit kasutada aku haldussüsteemi koostamiseks. Elektrokeemiliste mudelitega saab leida optimaalseid parameetreid elektroodi paksusele ja vormitegurile. Samuti saab kasutada mudelit termiliste analüüside sisendina. Lisaks saab ennustada mudeliga elemendi käitumist ekstreemsetest tingimustes nagu termiline ärajooks. [1]

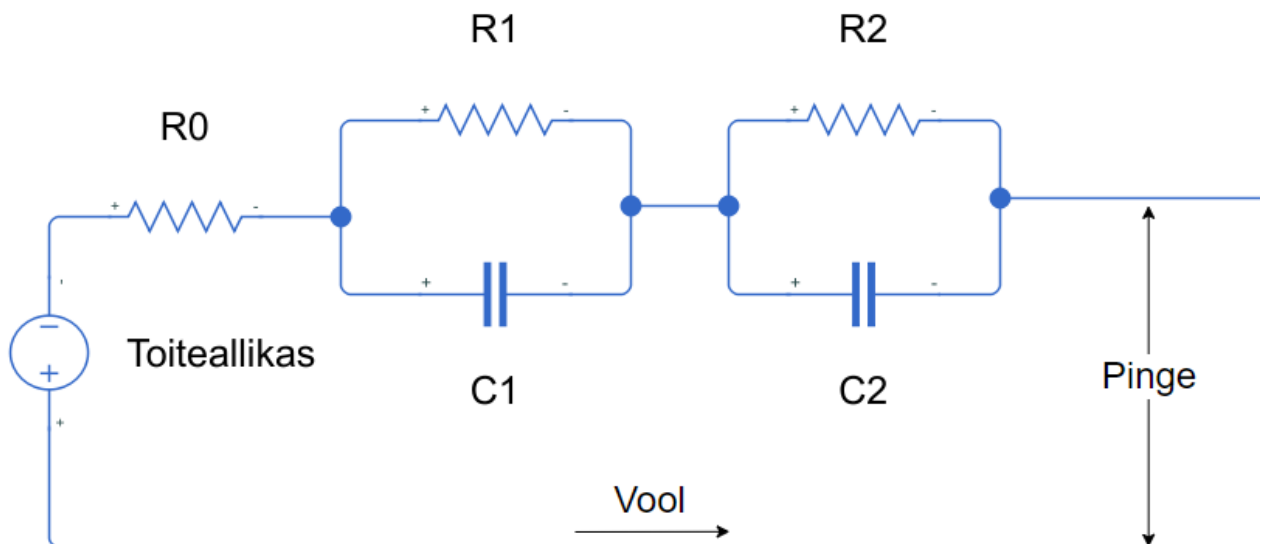
Matemaatilised mudelid on enamjaolt arendatud Shepherd mudelist. Mudelis leitakse parameetrid kurvi sobitamis tehnika kaudu. Matemaatilised mudelid on väga lihtsad, kuid rakendusest sõltuvad ja pole piisavalt täpsed dünaamilistes olukordades. [1]

Vooluringi põhised akumudelid on võimekad ja lihtsasti kasutatavad. Aku elemendi elektrokeemilised protsessid on asendatud elektriahelaga. Elektriahela mudelites kasutatavad komponendid on vooluallikas, takistid, kondensaatorid ja induktiivpoolid. Omakorda saab jagada vooluringi põhised mudelid kaheks. Thevenin baasi ja impedantsipõhine vooluringi mudel. Thevenini baasil mudelid on üles ehitatud kurvisobitamise tehnikal. Testidel mõõdetakse elemendi pingeid ja voolutugevusi erinevates keskkonna tingimustes, kus elementi kasutatakse. Impedantsipõhised mudelid töötatakse välja sobitamise teel impedantsi spektritega. Vooluringi põhised akumudelid on väga head termiliste analüüside sisendite saamiseks ja reaajas rakendatavad ja on võimalik käivitada riistvara ringlus platvormidel. See tähendab, et mudeleid saab edukalt kasutada akuhaldus süsteemide juhtimiseks ja sõiduki simulatsioonides. Sõiduki simulatsioonidega saab leida optimaalset akupaki

mahutavust ja sõiduki sõiduulatust. Mudeli täpsus on parem, kui matemaatilistel mudelitel, aga kehvem kui elektrokeemilistel mudelitel. [1].

2.2 Thevenin mudel

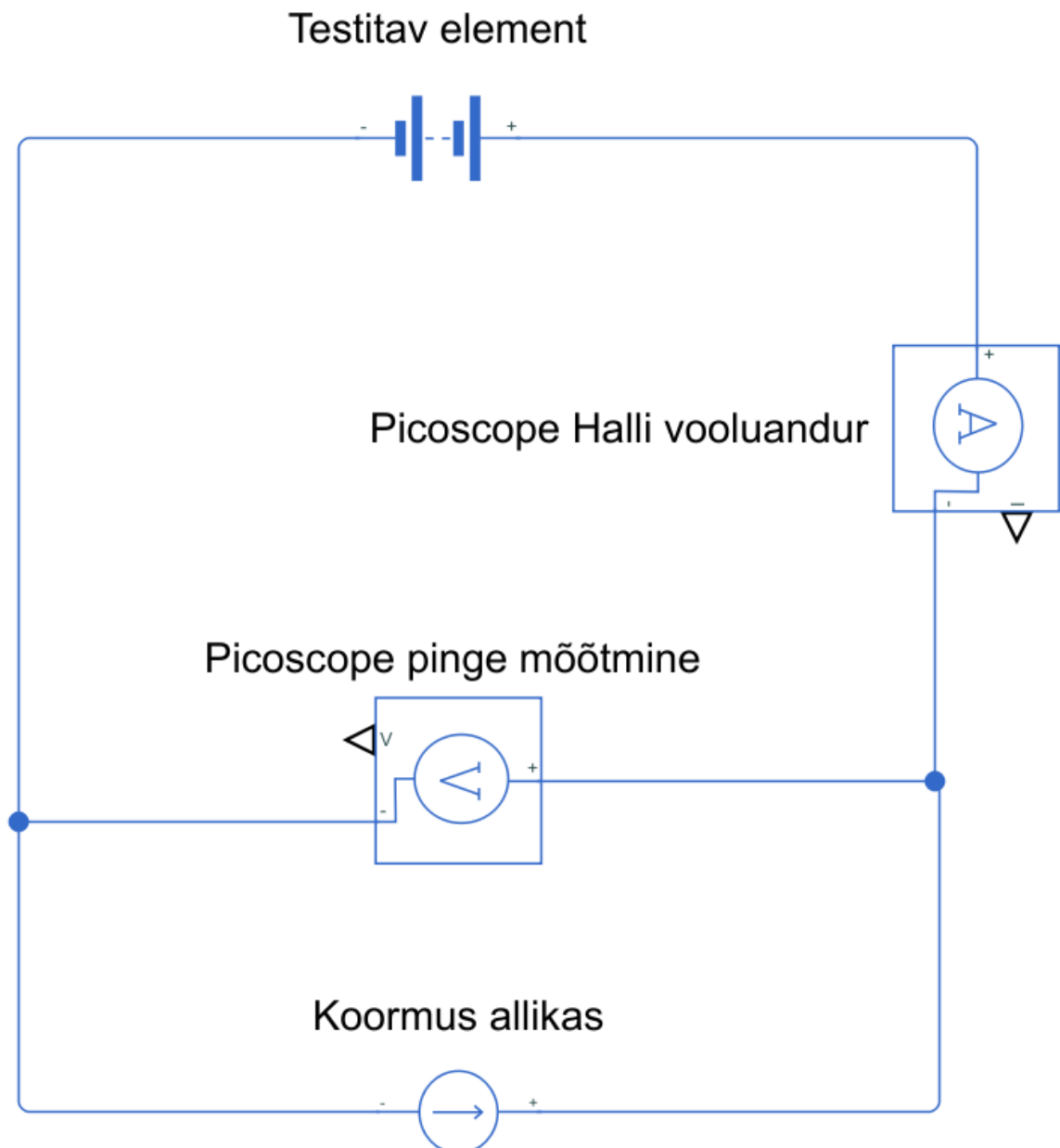
Thevenini baasil vooluringi mudeli koostamiseks kasutatakse aku ekvivalent skeemi. Skeem koosneb toiteallikast, elemendi oomilisest takistusest (R_0) ja elemendi polaarsest takistusest, mida kujutatakse takisti ja kondensaatori rööbiti ühendustega (RC). Elemendi oomiline takistus näitab elemendi sisemist takistust, mis koosneb terminali ja elektroodi takistusest. Oomiline takistus tekitab momentaalse pingelangu või tõusu elemendi koormamisel või laadimisel. Elemendi polaarne takistus tekitab ajas mööduva elemendi reaktsiooni. R_1 ja C_1 vastutavad elemendi ajas kiire reaktsiooni eest, mis on seotud elemendi elektroodi pindalaga. R_1 on laengu ülekande takistus ja C_1 tähistab elektrokeemilist mahutavust. R_2 ja C_2 vastutavad ajas aeglasemate reaktsioonide eest, mis on seotud elemendi difusiooni protsessist elektrolüüdis ja aktiivsest materjalist. Kõik need komponendid on funktsioonis aku laetus taseme (SOC), temperatuuri ja voolutugevusega. RC komponentide ahelasse lisamisega saab muuta elemendi mudelit täpsemaks, aga samuti ka pikendab analüüsi arvutus aega. Elemente testitakse, et leida elementide parameetrid, mis pole mõõdetavad. Oomiline ja polaarne takistus (väärtused: R_0 , R_1 , R_2 , C_1 , C_2) (Joonis 6). [1]



Joonis 6. Thevenin mudel

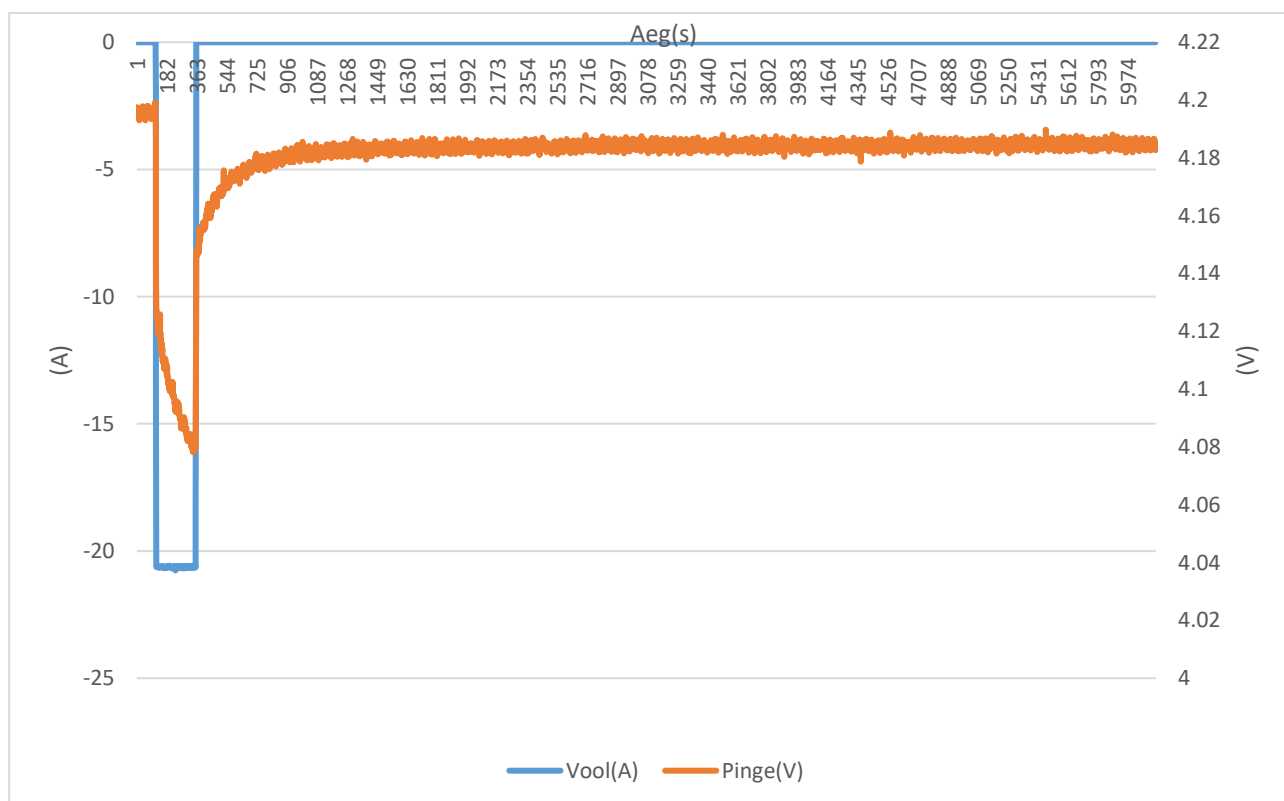
2.3 Aku elementide testimine

Aku elementide testimiseks kasutati impulsi võimsuse karakteriseerimist. Voolu pulseerimismeetodit kasutades saab leida elemendi dünaamilised parameetri. Selleks kasutati I-Techi kahe-suunalist programmeeritavat toiteplokki ja Picoscope andmete salvestamis seadet. (Joonis 7) Testimise ajal on vaja salvestada aku elemendi pinget ja voolutugevusi. Logimis sagedus oli 20 Hz kuna antud sageduse juures joonistuvad välja pingelangu ja tõusu kõverad.



Joonis 7. Elemendi testimine

Aku elemendi parameetrid on kõige stabiilsemad oma nimi parameetrite juures ning madala ja kõrge laetus taseme juures muutuvad elemendi parameetrid kiiremini. Sisendiks sai kirjutatud koormusprofiil, millega elementi koormati. Profiiliga laetakse aku elementi tühjaks tsüklite kaupa. (Joonis 8) Tsüklites laetakse elementi tühjaks 1% laetus taseme kaupa 3C-ga kuni 80%. Peale seda koormatakse elementi 5% laetus taseme kaupa 3C-ga kuni 20% ja peale seda uuesti 1% laetus taseme kaupa kuni 0%. Tühjaks laadimis tsüklite vahel tuleb oodata 15 minutit elemendi stabiliseerimiseks. 3C sai valitud tühjaks laadimis vooluks, kuna elemendi temperatuur peab püsima sama testi jooksul ja keskmine elemendist väljavõetav vool sõiduajal on 30 A elemendi kohta.



Joonis 8. Koormus tsükkel

Test elemendiks sai valitud eelmise aasta 6.8Ah 15C kott tüüpi element. (Tabel 2) Element oli läbinud kolme sigma sorteerimisahela ja osutus FEST 23 akupaki koostamiseks sobilikuks. Sellest võib eeldada, et element käitub väga sarnaselt FEST 23 akupakile. Kolme sigma sorteerimis ahel on mõeldud leidmaks võimalikult sarnaste parameetritega elemente. Iga elemendi parameetri kohta leitakse standardhälve ja keskmine väärtus. Ära elimineeritakse elemendid, mis on suurema hälbega, kui keskmine väärtus $\pm 3 \cdot$ standardhälve. Antud meetodit kasutatakse ideaalis seni, kuni ükski

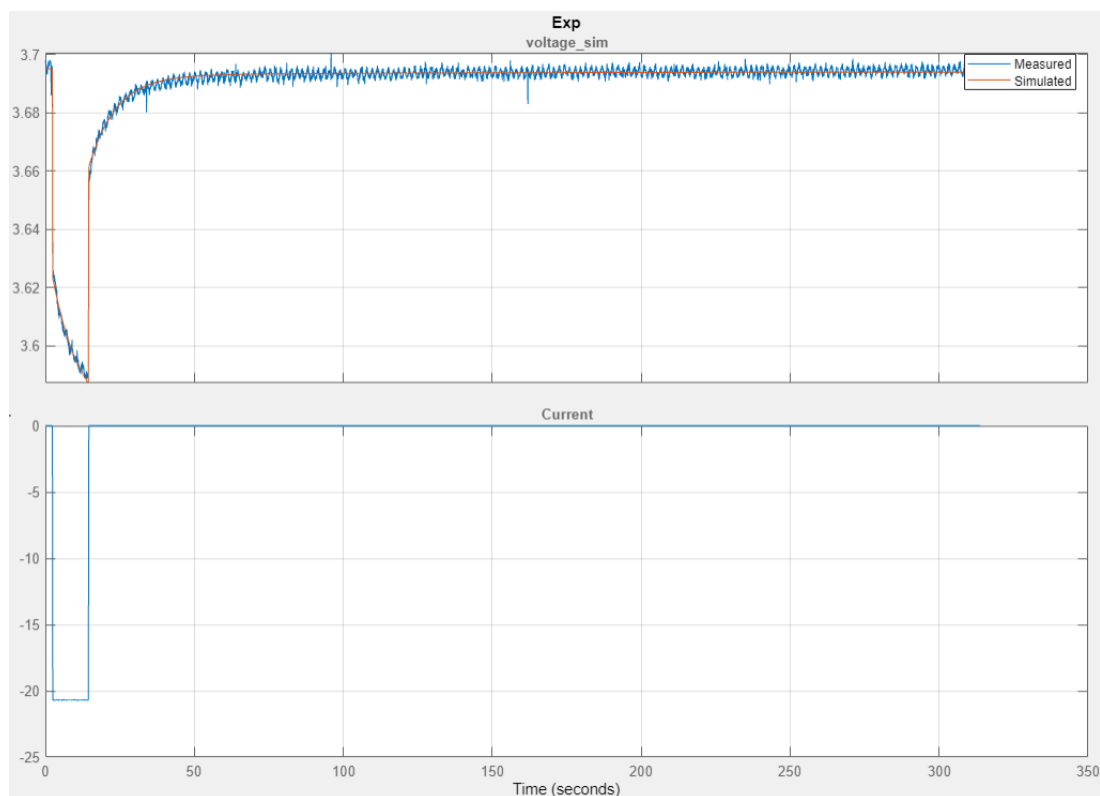
element ei jää väljaspoole 3 * standardhälbe piiridest või kuni saavutatakse vajaminevate elementide arv. (Lisa 1.)

Tabel 2 Elemendi andmed

mahutavus	nominaal pinge	töövahemik	maksimaalne tühjakslaadimisvool	maksimaalne täislaadimisvool	temperatuuri vahemik
6.8Ah	3.7V	2.8-4.2V	136A	61.2A	0-60 kraadi

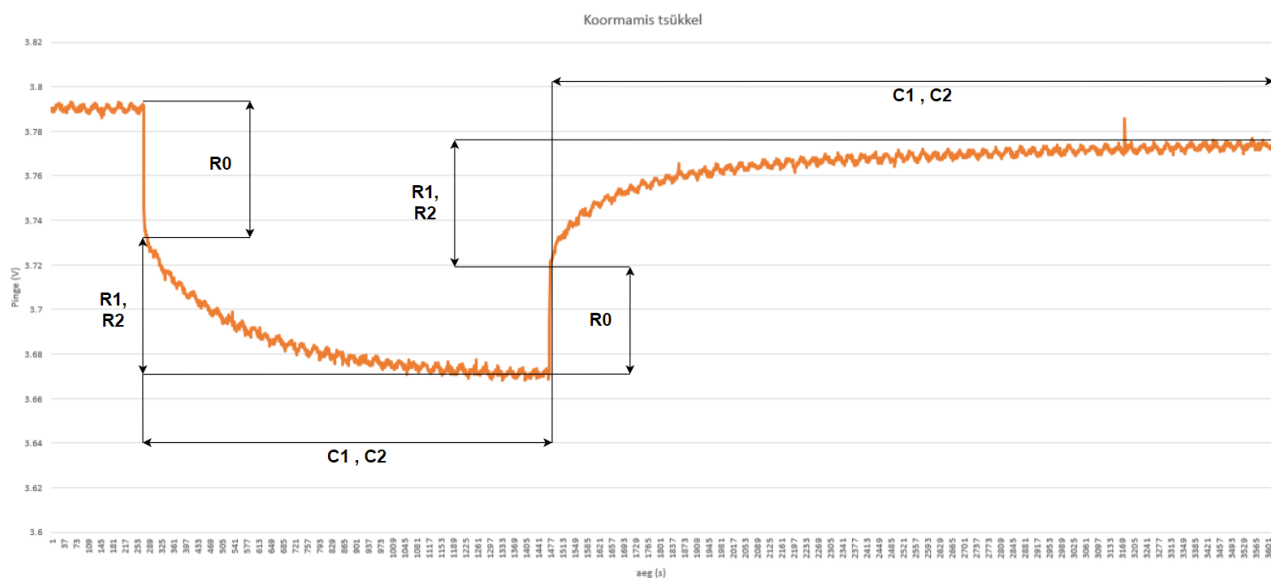
2.4 Ekvivalent mudeli takistuste ja mahutavuste leidmine

Elemendi parameetrite leidmiseks kasutati Matlabi parameetrite hindamise programmi. Programm leiab aku elemendi parameetrid sobitades pingelangu kõverat reaalselt testitud elemendi pingelangu kõvera peale. (Joonis 9) Parameetrite leidmisel kasutati 2 RC ahelat kuna 3. RC ahela mõju tuleb välja pikemaajaliste testide puhul. Kondensaatori väärtust kujutatakse simulatsioonis ajalise väärtusena 1. RC ajaline väärtus on 10-100 sekundit, 2 RC ajaline väärtus on 100-500 sekundit ja 3 RC ahela ajaline väärtus on 500-5000 sekundit. Parameetrite hindamise puhul prooviti ka 3 RC ahelaga parameetrite leidmist, kuid programm ei suutnud leida parameetreid 3. ahelale. Samuti lisaks 3 RC ahela lisamine aega edaspidiste simulatsioonide jooksumisele.



Joonis 9. Parameetrite leidmine parameetrite hindamis programmiga

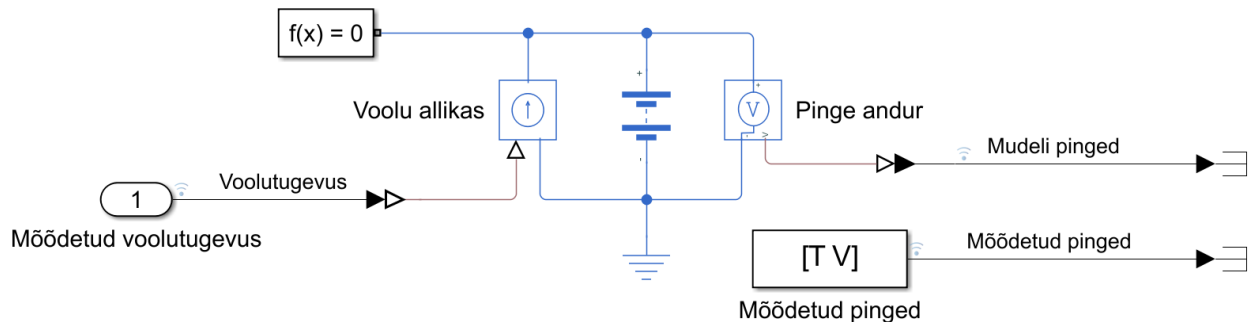
Keskkonda tuleb sisendina sisse tuua elemendi testimisest mõõdetud voolud. Väljundiks on testimisel mõõdetud pinged. R_0 väärtused leitakse hetkelisest pingelangusest ja pingetõusust ning RC ahela väärtused eksponentsiaalse pinge languse ja tõusu kõvera kaudu. (Joonis 10)



Joonis 10. Parameetrite leidmis loogika

2.5 Valideerimine

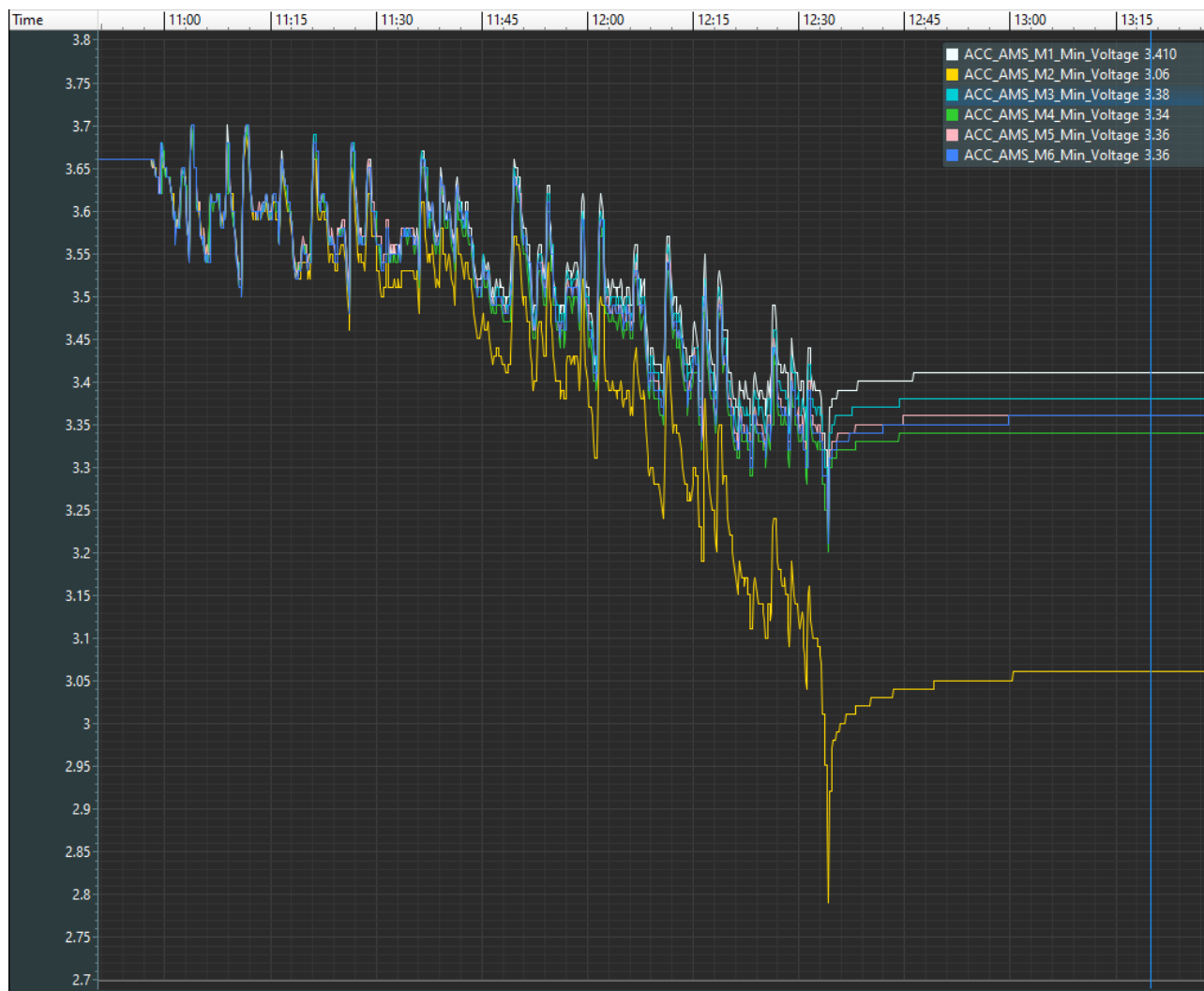
Parameetrid olemas alustati mudeli valideerimisega. Valideerimiseks, kasutati mudelit, mis võrdleb mudeli tulemusi FEST 23 võistlus kestvussõitude andmetega. Sisendiks kasutati sõitude voolusi ja väljunditest võrreldi mudeli pinget võistlustel mõõdetud pingega. (Joonis 11) Valideerimise käigus jälgitakse, kas mudel käitub sama moodi nagu päris element. Vastasel juhul ei saaks kasutada mudelit akuhaldussüsteemi mudeli koostamiseks.



Joonis 11. Valideerimis mudel

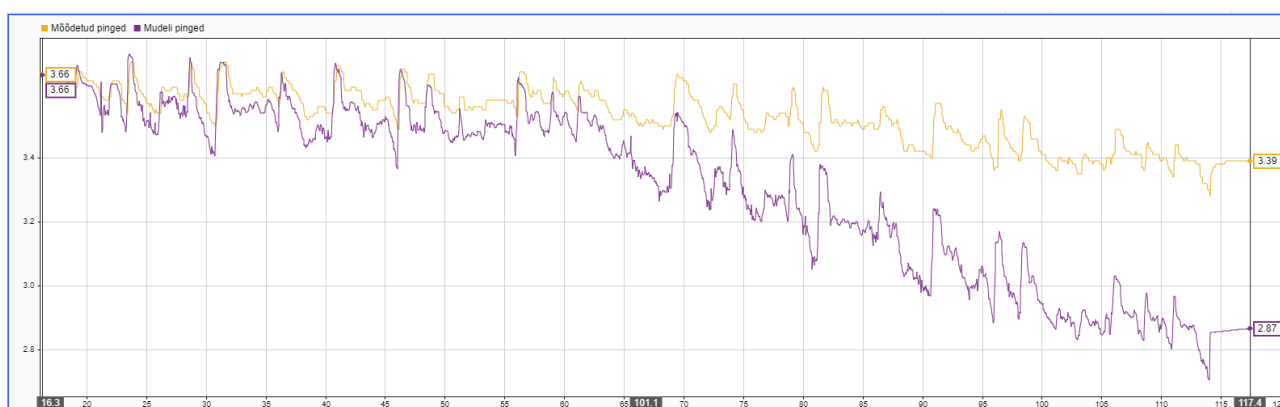
Võrdluseks võtsin FEST 23 Itaalia ja Saksa kestvussõidu andmed. Andmeid vaadates on näha kohati amplituudi erinevust kuni 100 mV ja lõpus staatilises olukorras on pingete erinevus 20 - 30 mV. Erinevused võivad tulla mõõtmis täpsustest. Mudeli täpsust mõjutab nii pinge, kui voolu mõõtmis hälbed. Samuti mõjutab mudeli täpsust ka temperatuur. Temperatuuri tõusuga väheneb elemendi sisemine takistus ja suureneb maksimaalne energia kogus, mida saab elemendist kätte saada. (Lisa 1 ja 2)

Samuti sai vaadatud kuidas element käitub madalamatel pingetel. Selleks võeti FEST 23 testi logi, kus akupakk sõideti tühjaks, kuni elemendi minimaalne pinge käis pingelimiidi alampiirist üle. Mudelit võrreldi omavahel moodulite madalaimate pingetega. Valiti madalaimatest pingetest kõige tugevam element 1. moodulist (joonisel valge joon) ja madalaimatest pingetest kõige nõrgem element 2. moodulist (joonisel kollane joon). (Joonis 12)



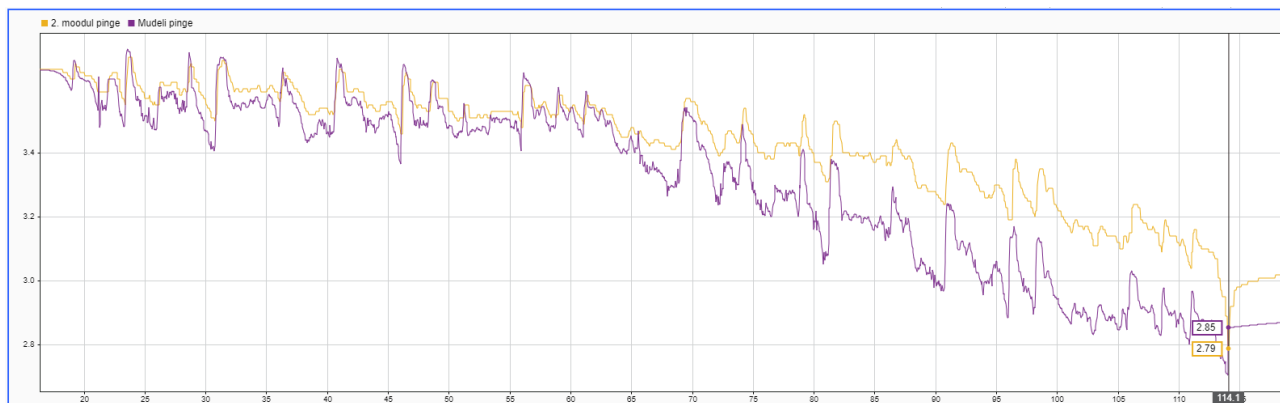
Joonis 12. Moodulite madalaimad pinged alam limiidini sõites

Moodul 1 madalaima elemendi pinget võrreldes mudeli pingega on näha suurt erinevust. See on hea kuna kestvussõidu lõpu määrab kõige madalaima pingega element. (Joonis 13)



Joonis 13. Mudeli võrdlus mooduli 1 madalaima pingega elemendiga

Mooduli 2 madalaima elemendi pinget võrreldes mudeli pingega on näha, et mudeli pinge on alati madalam, kui reaalne pinge. See on hea kuna sellisel juhul jääb väike varutegur selle vahel, kui akuhaldussüsteem näitab laetustase nulli ja millal päriselt akupakk tühi on. (Joonis 14)



Joonis 14. Mudeli võrdlus mooduli 2 madalaima pingega elemendiga

3 AKUHALDUSSÜSTEEMI MUDELI KOOSTAMINE

FEST 23 akupaki koostamiseks kasutati kott tüüpi Melasta 6.8 Ah 15 C elemente. (Joonis 15)



Joonis 15. Melasta 6.8 Ah 15C element

Akupaki konfiguratsioon oli 144 jadamisi 2 paralleeli ja koosnes 6 identsest moodulist. Kogu akupaki kaal on 43 kg. Akupaki maksimaalne pinge oli 600 V ja mahutavus 7.2 kWh. FEST 23 kasutas akupaki SOC-i arvutamiseks Coulumbi loendusmeetodit. Keskmiselt kasutati FEST 23 kestvussõitude jooksul 6-6.5 kWh energiat kuni akuhaldus süsteem näitas aku mahutavuseks 0%. Üksik elementide testide põhjal eeldaks kogu akupaki maksimaalseks mahutavuseks 7.2 kWh. (Tabel 3) Täpse akumudeli koostamisega oleks võimalik võita mahutavuse pealt 10 – 20%.

Tabel 3. Üksik elemendi tühjaks laadimised kestvussõidu vooludega

Test	Start DateTime	Voltage (MIN;MAX),[V]	Current(Discharge;Charge),[A]	Charge_Capacity(Ah)	Discharge_Capacity(Ah)	Batterypack_Capacity(kWh)
1	9/30/2022 12:30	2.85;4.22	110;70	2.7749	9.989	7687.34496
2	9/30/2022 15:30	2.87;4.23	110;70	2.7749	9.9915	7690.00896
3	9/30/2022 18:30	2.8;4.2	110;70	2.6422	9.5296	7339.21344
4	9/30/2022 21:30	2.8;4.2	110;70	2.6422	9.5266	7336.01664
5	10/1/2022 0:30	2.8;4.2	110;70	2.6177	9.469	7300.74528
6	10/1/2022 3:30	2.8;4.23	110;70	2.6161	9.6806	7527.9312
7	10/1/2022 6:30	2.8;4.17	110;70	2.5838	9.3336	7192.58688
8	10/1/2022 9:30	2.8;4.2	110;70	2.6422	9.5259	7335.27072
9	10/1/2022 12:30	2.8;4.2	110;70	2.6177	9.4815	7314.06528
10	10/1/2022 15:30	2.8;4.21	110;70	2.6453	9.5551	7363.08288
11	10/1/2022 18:30	2.8;4.23	110;70	2.707	9.7582	7513.75872
12	10/1/2022 21:30	2.8;4.19	110;70	2.6177	9.4921	7325.36064
13	10/2/2022 0:30	2.8;4.22	110;70	2.726	9.7946	7532.30016
14	10/2/2022 3:30	2.8;4.18	110;70	2.6177	9.4719	7303.83552
15	10/2/2022 6:30	2.8;4.18	110;70	2.6442	9.5339	7341.66432
16	10/2/2022 9:30	2.8;4.19	110;70	2.6363	9.4882	7301.38464
17	10/2/2022 12:30	2.8;4.22	110;70	2.7011	9.722	7481.47104
18	10/2/2022 15:30	2.8;4.23	110;70	2.7286	9.7946	7529.5296
19	10/2/2022 18:30	2.8;4.18	110;70	2.6161	9.4432	7274.95776
20	10/2/2022 21:30	2.8;4.2	110;70	2.6878	9.6806	7451.52768
21	10/3/2022 0:30	2.8;4.19	110;70	2.6549	9.5963	7396.75584
22	10/3/2022 3:30	2.8;4.21	110;70	2.7311	9.845	7580.57184
23	10/3/2022 6:30	2.8;4.2	110;70	2.6453	9.5834	7393.23936
24	10/3/2022 9:30	2.8;4.21	110;70	2.6832	9.655	7429.15008
25	10/3/2022 12:30	2.8;4.2	110;70	2.707	9.746	7500.7584
26	10/7/2022 15:00	2.8;4.2	110;70	2.5575	9.5871	7490.74176
27	10/7/2022 18:00	2.8;4.21	110;70	2.5215	9.582	7523.6688
28	10/7/2022 21:00	2.8;4.21	110;70	2.6749	9.6211	7401.87072
29	10/8/2022 10:00	2.8;4.2	110;70	2.6749	9.6039	7383.5424
30	10/8/2022 13:00	2.8;4.2	110;70	2.4511	9.57	7585.89984

3.1 Akupaki mudeli ülesehitus

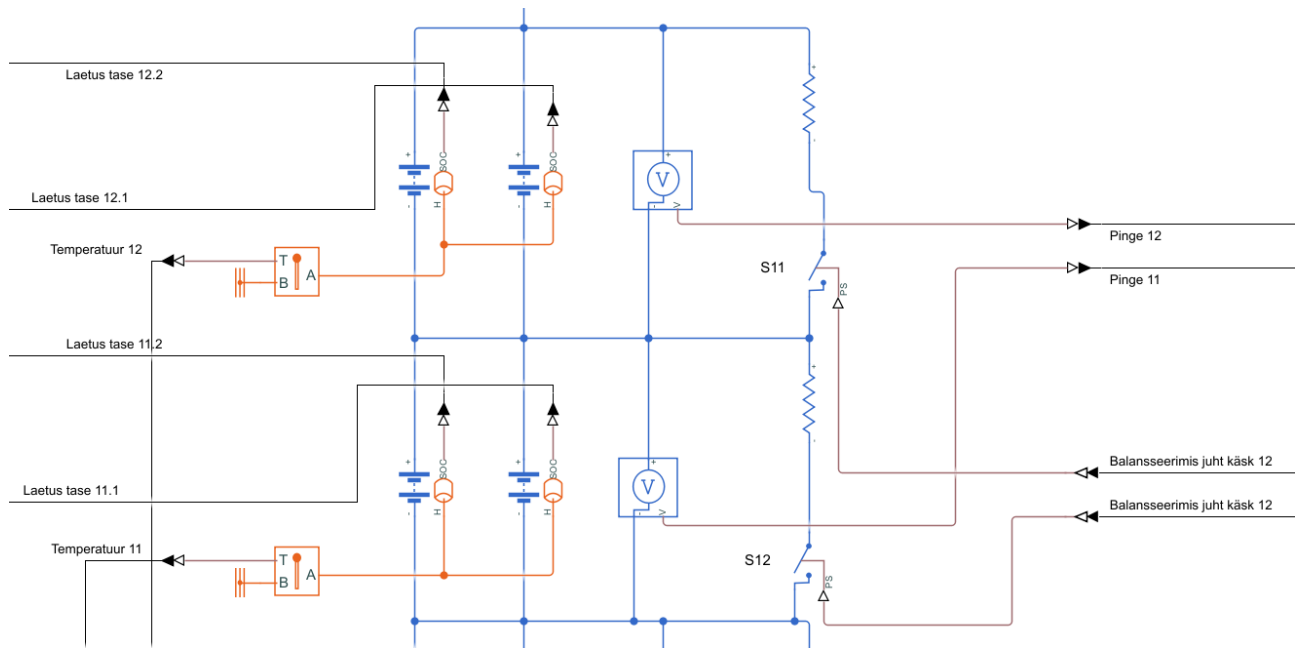
Akupaki mudeli ülesehitusel tuleb arvestada võistlus sarja reeglitega ja kasutatava riistvaraga. Maksimaalne lubatud pinge akupakil on 600 V, mis teeb ühe elemendi maksimaalseks pingeks 600 V / 144 jadamisi ühendust = 4.166V. Mooduli pinge ei tohi ületada 120 V, maksimaalse energia kogus peab püsima alla 6 MJ ja maksimaalne mooduli mass alla 12 kg. (Tabel 4) Samuti tuleb mõõta kõikide elementide pingeid ja vähemalt 30% elementide temperatuure. Akupaki maksimaalne lubatud temperatuur on 60 kraadi. FEST 24 akupakil kasutatakse samu elemente, mis eelmine aasta ja konfiguratsioon jääb samaks. [6]

Tabel 4 Mooduli andmed

element				moodul				
Mahutavus (Ah)	kaal (kg)	pinge (V)	energia (Wh)	jadamisi	paralleeli	kaal (kg)	energia (Wh)	energia (J)
6.8	0.125	3.7	25.16	24	2	6	1207.68	4347648

Akupaki pingete ja temperatuuride logimine käib läbi LTC6811 loogikakiibi. Antud kiibiga on võimalik lugeda 12 elemendi pingeid ja 4 elemendi temperatuure. Iga paralleel ühenduse kohta on vaja ühte pingemõõte punkti kuna paralleeli ühendatud elemendid ühtlustavad ise omavahel oma

pingete erinevused. Samuti saame mõõta ühe temperatuuri anduriga mõlema paralleeli ühendatud elemendi temperatuuri. Ehk ühe LTC-ga saame mõõta 24 elemendi pingeid ja 8 elemendi temperatuure. Ühele moodulile on paigaldatud 2 LTC-d, millega saame mõõta 48 elemendi pingeid ja 16 elemendi temperatuure. Antud lahendusega suudame täita reeglipunkte, mis nõuavad kõikide elementide pingete ja vähemalt 30% elementide temperatuuride mõõtmist. Samuti on LTC-l olemas ka passiiv ja aktiiv balansseerimis loogika. Ühe LTC-ga saab balansseerida 12 mõõdetava elemendi pingeid. (Joonis 16) [7]



Joonis 16. Kaks paralleeli ühendust koos pinge ja temperatuuri mõõtmise ja balansseerimis ahelatega

3.2 Laetustaseme arvutamise funktsioon

Üks olulisemaid ülesandeid akumudelil on aku laetustaseme hindamine. Aku laetustaset on vaja teada järelejäänud energia arvutamiseks ja juhtimisstrateegia valikuks. Täpne laetustaseme hindamine tagab turvalise akupaki kasutuse vältimaks ülelaadimist ja alalaadimist. Samuti võimaldab see pikendada aku eluiga ja suurendada energiasäästlikust. Kuna aku elementide laetustaset pole võimalik kuidagi otseselt mõõta tuleb seda tuletada mõõdetavate parameetrite järgi. Dünaamilistes olukordades on endiselt väga keeruline hinnata aku laetustaset, kuna akumodelite võimekused on piiratud ja mõõdetavates parameetrites esineb mõõtemääramatusi. [8]

3.2.1 Laetustaseme arvutamise meetodid

Aku laetustaseme arvutamiseks saab kasutada erinevaid meetodeid. Laetustase näitab aku elemendist välja võetud mahutavust ($Q(t)$) ja nimimahutavuse (Q_n) suhet. (Võrrand 1) Nimimahutavus on tavaliselt tootja poolt antud ja näitab, kui palju mahub elementi energiat maksimaalse laetus astme juures. [8]

Võrrand 1. Laetus taseme valem

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_n}$$

Erinevaid matemaatilisi meetodeid kasutatakse elementide laetus taseme arvutamiseks. Need erinevad omavahel oma keerukuse ja täpsuse poolest. Samuti on erinevatel laetus taseme hindamis meetoditel erinevad kasutusvaldkonnad. Laetus taseme hindamiseks on levinumad meetodid:

Pingemeetod on kõige lihtsam arvutamise meetod laetus taseme arvutamiseks. Aku järelejäänud mahutavust saab määrata kontrollitud tingimustes tühjenemistest abil. Pingemeetod teisendab aku pinget näidu samaväärseks laetus taseme väärtuseks, kasutades aku teadaolevat tühjaks laadimise kõverat (pinge VS laetus taseme). Aku elemendi pinget mõjutab temperatuur ja vool. Temperatuuri ja voolu mõju sisse arvestamiseks tuleb luua voolu ja pinget ning voolu ja temperatuuri otsingutabeleid. Vajadus stabiilse voolu järgi muudab antud meetodi rakendamise keerukaks. Samuti muudab mitmete otsingutabelite sisendite testimine meetodi liiga aega nõudvaks. [8]

Coulumbi loendusmeetod arvutab allesjäänud akumahutavuse sisse ja välja laetud voolude järgi. Selle meetodi täpsus oleneb kõige rohkem aku voolude täpsest mõõtmisest ja algse akulaetus taseme hindamisest. Esialgse laetus taseme saab hinnata mõõdetavate parameetrite kaudu. Edasi saab arvutada laetus taset integreerides täis- ja tühjaks laadimise voolude laadimise ajaga. Valemis $SOC(t)$ on hetke laetustase, $I(t)$ hetke vool ja Q_n elemendi mahutavus. (Võrrand 2) See meetod ei arvesta, et tühjaks laadimise mahutavus on alati väiksem, kui täislaadimise mahutavus. Kuna elemendil on laadimise ja tühjaks laadimise kaod. Laetus taseme täpsemaks hindamiseks tuleks sisse arvestada ka elemendi kaod. Muidu on meetod kergesti rakendatav ja ei nõua mahukaid testimisi. [8]

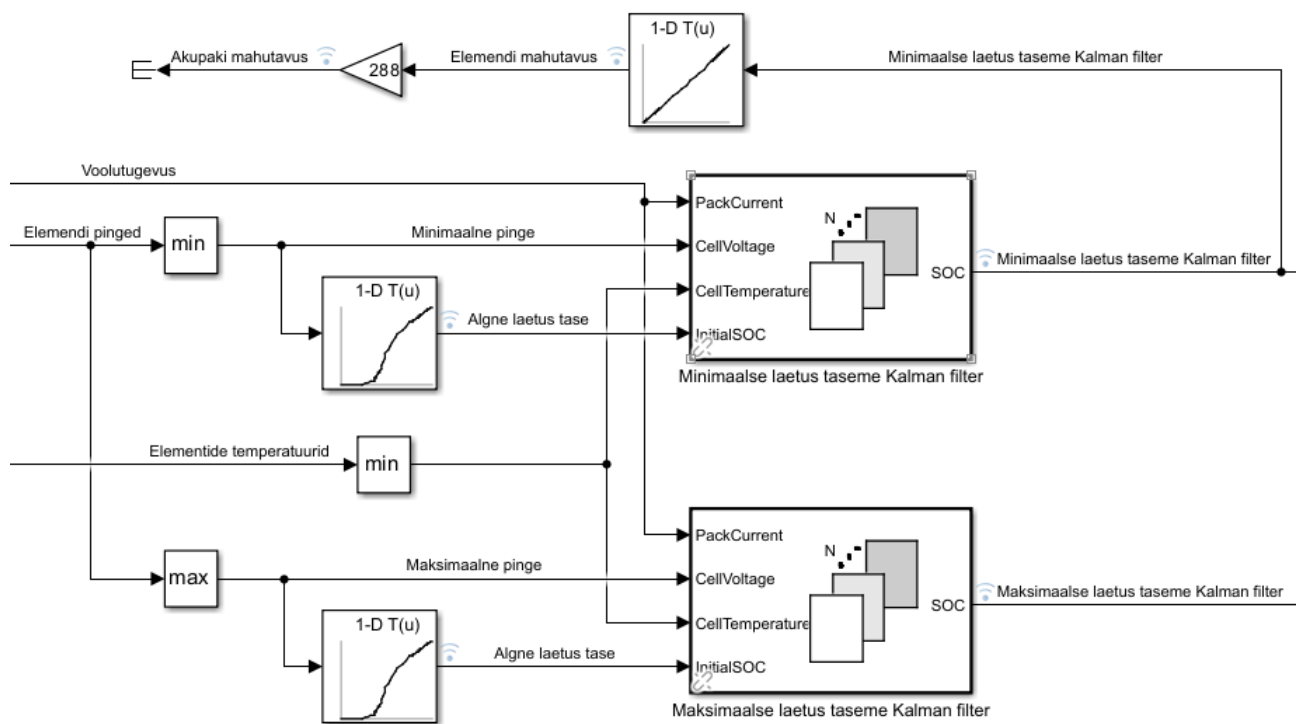
Võrrand 2. Coulumbi loendusmeetodi valem

$$SOC(t) = SOC(t - 1) + \frac{I(t)}{Q_n} \Delta t$$

Kalmani filtri meetodit saab kasutada, mis tahes dünaamilise süsteemi sisemise oleku hindamiseks. Võrreldes teiste hindamismeetoditega pakub Kalman filter automaatselt oma olekuhinnangutele dünaamilised veapiirid. Kasutades Kalman filtri meetodit laetus taseme arvutamiseks, leiame nii laetus taseme väärtuse, kui arvutus vea piirid. Edasi muutub laetus taseme arvutamine mudeli põhiseks olekuhindamis tehnikaks, mis kasutab laetus taseme reaajas prognooside pakkumiseks veaparandusmehhanismi. Kuigi Kalman filter saab hästi hakkama dünaamilistes olukordades vajab see elemendi mudelit ja selle parameetrite täpset tuvastamist. [8]

3.2.2 Kalman filter

Kalman filtri plokk on vaja akupaki minimaalse ja maksimaalse laetus taseme arvutamiseks. Akupaki maksimaalset laetus taset on vaja laadimis voolupiiraja sisendiks. Minimaalset laetus taset on vaja tühjaks laadimis voolupiiraja sisendiks ja allesjäänud mahutavuse arvutamiseks. Kalman filter arvutab akupaki laetus taseme vastavalt elemendi mudeli parameetritele. Kalman filtri sisendiks on vaja akupaki voolu, elemendi pingeid, temperatuure ja algset laetus taset. Akupaki sisend vool saadakse akupaki voolu lugejast. Elementide pingetest tuleb leida minimaalne ja maksimaalne pinge. Sellisel juhul arvutatakse kõige madalam laetus tase kõige madalama elemendi pingest ja kõrgeima kõrgeimaist. Samu pingeid kasutatakse algse laetus taseme leidmiseks läbi pinge ja laetus taseme otsingutabeli. Temperatuuri sisendiks kasutatakse minimaalset elemendi temperatuuri kuna madala temperatuuri juures on elemendi sisemine takistus kõige suurem. (Joonis 17)



Joonis 17. Aku laetus taseme ja alles jäänud mahutavuse plokk

FEST23 Saksamaa kestvussõidu andmeid kasutati laetustaseme plokkide valideerimiseks. Kestvussõidu keskel, kui toimub juhivahetus on Kalman filtri laetus tasemed 45 ja 48%. Tulemuste võrdlemisel elemendi mudeli parameetritega leiti, et tegelikud väärtused on 50-55%. Kestvussõidu keskel on oluline, et akulaetus taset ei hinnata kõrgemalt, kui reaalsuses. See on oluline kuna sõiduki allesjäänud mahutavust arvutatakse laetus tasemest ning alles jäänud ringide sõidustrateegia pannakse selle järgi paika. Kestvussõidu lõpus on Kalman filtri laetus tasemed 5 ja 6%. Elemendi mudeli parameetrite põhjal 5-10%. Kestvussõidu lõpus on oluline minimaalse laetus taseme täpsus. Kestvussõidu teisel poolel on Kalman filter parandanud oma eksimust. Eksimus kestvussõidu keskel võib tuleneda sellest, et 20-80% laetustaseme juures mõõdeti elemendi parameetreid 5% laetustaseme kaupa. (Lisa 4)

3.3 Elementide balansseerimis funktsioon

Akupaki mudeli üheks tähtsaks ülesandeks on elementide balansseerimine. Elementide tootmis kvaliteedist tulenevad erinevused tekitavad akupakis elementide laetustaseme erinevust kasutus tsüklite jooksul. Akupaki täis laadimist hakkab piirama kõige kõrgema laetustasemega element ja tühjaks laadimist kõige madalama laetustasemega element. See vähendab kogu akupaki kasutatavat mahutavust kiiresti kuni akupakk on lõpuks kasutus kõlbmatu. Ehk balansseerimisel on suur roll kogu akupaki eluea pikendamisel. Balansseerimis meetodeid on erinevaid. Balansseerimis süsteemid erinevad üksteisest suuruse, keerukuse, rakenduse, balansseerimis kiiruse ja maksumuse poolest. Suures pildis saab jagada balansseerimis süsteemid kahte kategooriasse passiiv ja aktiiv balansseerimine. [9]

Passiiv balansseerimis meetodiga laetakse rohkem täislaetud elemendid tühjamaks kuni kõik elemendid on saavutanud sama laetus taseme, mis on kõige madalama laetus tasemega elemendil. Takistit kasutatakse paralleel ühendusena ainult või paralleel takisti ja lülitiga, mida juhitakse kontrollieriga. [9]

Ainult takisti paralleel ühendusega balansseerimis meetod kasutab pidevat voolu möödalaskmist läbi takisti. Iga elemendi kohta on vaja üht paralleel takistit. Sellisel juhul piirab elemendi maksimaalse pinge paralleelne takisti. Meetod on väga lihtne ja odav, aga eraldab laadimisel pidevalt soojust. Lahendust saab kasutada ainult plii ja nikli baasil elementidel, kuna neid elemente saab üle laadida ilma kahjustamata elementi. [9]

Juhitud paralleel takistiga balansseerimine vajab iga elemendi kohta üht paralleel takistit ja lüliti. Balansseerimise käigus mõõdetakse kõikide elementide pingeid ja lülitatakse lüliti, millise elemendi pinge on kõige kõrgem. Lüliti ühendamisel laetakse elementi tühjemaks läbi takisti. Lüliteid lülitatakse seni kuni kõikide elementide pinged on saavutanud madalaima pingega elemendi pinge. Takisti ja lülitiga balansseerimis meetod on lihtne, odav ja efektiivsem, kui ainult paralleel takistiga balansseerimine, kuid vajab juhtimis kontrollierit. Lisaks saab kasutada antud lahendust Li-ioon elementidega. [9]

Aktiiv balansseerimis meetodiga laetakse rohkem täislaetud elemendid tühjamaks akupakki või kõige madalama laetus tasemega elementi. Aktiivbalansseerimis topoloogiaid on palju erinevaid vastavalt oma energia liigutamise elemendile. Enamjaolt kasutatakse energia liigutamiseks kondensaatoreid, induktoreid või konvertereid. Aktiiv balansseerimis meetodid on keerukamad kui passiiv

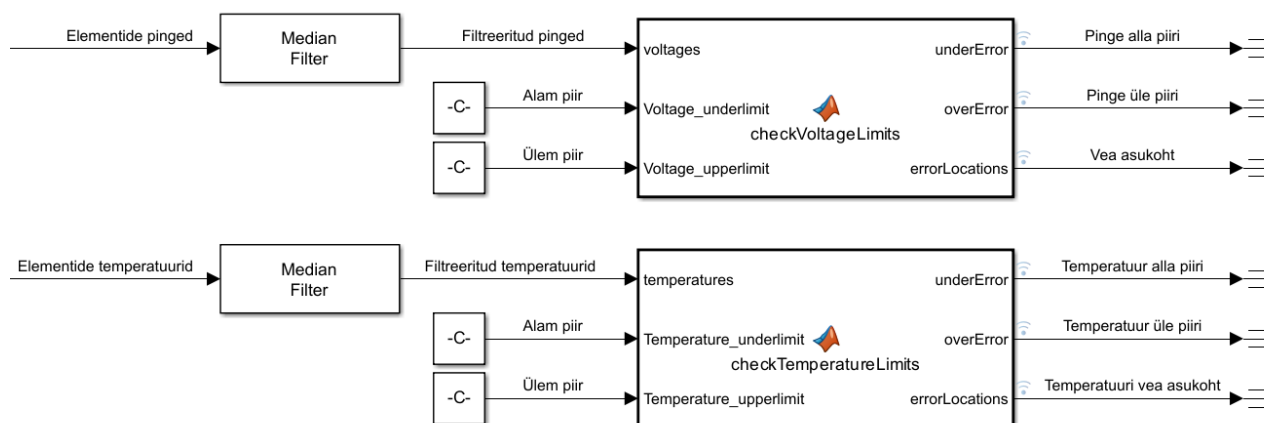
balansseerimis meetodid. Üldjuhul vajavad aktiiv balansseerimis ahelad rohkem komponente ja keerukamat juhtimist. [9]

FEST24 balansseerimise süsteemiks kasutatakse passiiv balansseerimist läbi takisti koos lüliti ja kontrolleri juhtimisega. See on kõige kergem ja lihtsamini kasutatav balansseerimis meetod, mida saab kasutada Li-ioon elemendituga. Võidusõidu vormeli puhul on oluline, et süsteem oleks kerge ja võtaks vähe ruumi. Samuti kasutatakse akupakki võimalikult optimaalses töövahemikus testimise käigus ja töötsükleid on vähe. Kogu hooaja jooksul laetakse akupakki alla 50 korra täis ja kasutakse enamjaolt akupakki 20-85% laetus taseme juures ja hoiustatakse 60% laetus taseme juures, mida soovitakse ka kirjanduses. [4] Kogu akupaki mahutavust kasutatakse ainult kestvussõitudel, mida on alla 10 hooaja jooksul. FEST23 test ja võistlus hooaja jooksul ei kasutatud kordagi elementide balansseerimist kuna elementide pingetes ei tekkinud kasutuse jooksul suuri erinevusi. Hooaja lõpus suurim pingete erinevus täislaetud akupaki juures oli 20 mV. Samuti on oluline jälgida enne balansseerimist, mida teeb kõige kõrgema pingega element madalate pingete juures. Kui sama element on madalate pingete juures kõige madalam ei anna antud elemendi balansseerimine juurde akupaki mahutavust. Enne FEST23 hooaega on kasutatud balansseerimist ja balansseerimis ahela eemaldamine ei tooks suurt kaalu ja ruumi võitu. Samuti on käsitsi balansseerimine väga aega nõudev ja ohtlik.

FEST24 kasutatakse passiiv balansseerimise teostamiseks loogikakiipi LTC6811. Kiibile tuleb saata mikrokontrolleri signaal, millist elementi tuleb tühjaks laadida. Vastavalt sellele lülitab kiip vastava elemendi lülitit. Signaali saadetakse seni kuni jõutakse lävend vääruseni, mille saab seada kasutaja. Kuna LTC suudab mõõta elemendi pinget paari mV täpsusega seatakse lävend väärtuseks 10mV. (Lisa 5) [7]

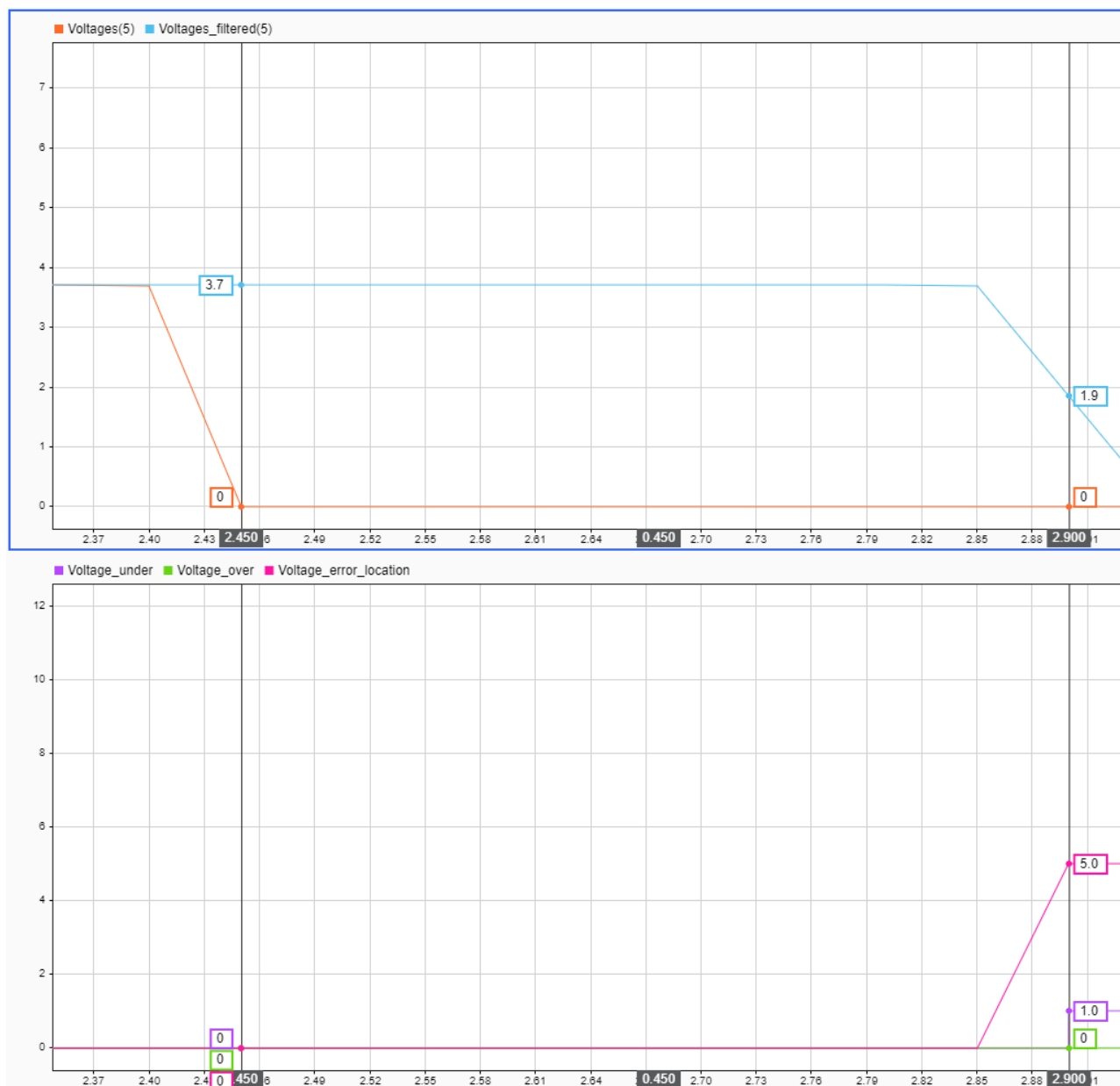
3.4 Vea tuvastus funktsioon

Vea tuvastusest on oluline tuvastada, kui mõne elemendi pinge või temperatuur on väljaspool soovitud vahemikke. Oluline on tuvastada ühenduse katkemine anduriga . Lisaks tuleb arvestada, ka mõõtmis müraga, mis võib ekslikult anda anduri vea teate. Samuti on hea teada vea asukohta, et oleks lihtsam leida vea põhjust. Antud funktsiooni tuleks rakendada nii temperatuuri, kui pinge mõõtmisele. Sisendina tulevad sisse mõõtmis pinged ja temperatuurid. Väljunditest antakse välja vea kirjeldus ja asukoht. Konstantidega saab kasutaja määrata soovitavad ülem ja alam limiidid. (Joonis 18) Pinge töövahemikuks määrati 2.8 – 4.166 V ja temperatuuri vahemikuks 10 – 60 kraadi.

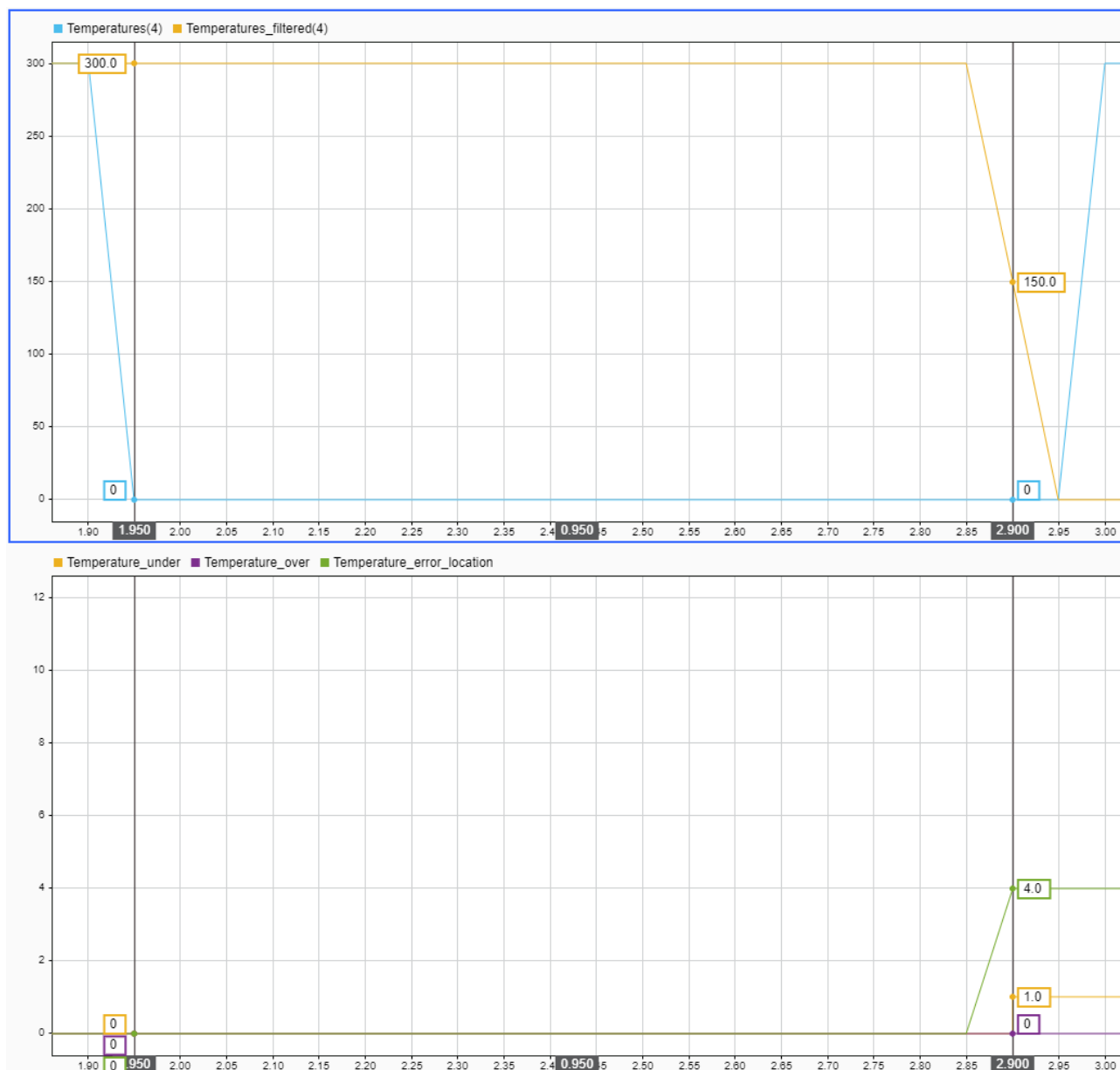


Joonis 18 Pinge ja temperatuuri mõõtmiste kontroll plokid

Võistlussarja reeglitega on määratud, et akuhaldus süsteem peab tuvastama elemendi pinge vea 0.5 sekundiga ja temperatuuri vea 1 sekundiga. [6] Selleks, et veatuvastusplokk ei tuvastaks vale mõõtmisest tulevat väärtust ja vea kuvamine ei oleks momentaalne. Vältimaks antud olukorda lisati veatuvastusplokki ette mediaan filtrid, mis arvutavad jooksva mediaan väärtuse 20 ja 40 viimase väärtuse järgi. (Joonis 18) Teades, et meie pingete ja temperatuuride logimis kiirus on 20 Hz ehk iga 0.05 sekundi tagant lasin mediaan filtri viimase 20 väärtusega ehk viimase 1 sekundi jooksul olnud väärtustest arvutatakse mediaan väärtus. Sellisel juhul on vaja et vähemalt pooled väärtused oleks väärtusega, et veaplokk väljundisse vea kuvaks. Poolte väärtuste vahetumis aeg on täpselt $10 \times 0.05 \text{ sekundit} = 0.5 \text{ sekundit}$. (Joonis 19) Sama lahendust kasutati ka temperatuuri vea tuvastamise puhul ainult mediaan väärtus arvutatakse viimase 40 väärtuse põhjal ja vea tuvastus aeg on 1 sekund. (Joonis 20)



Joonis 19. Pinge vea tuvastus

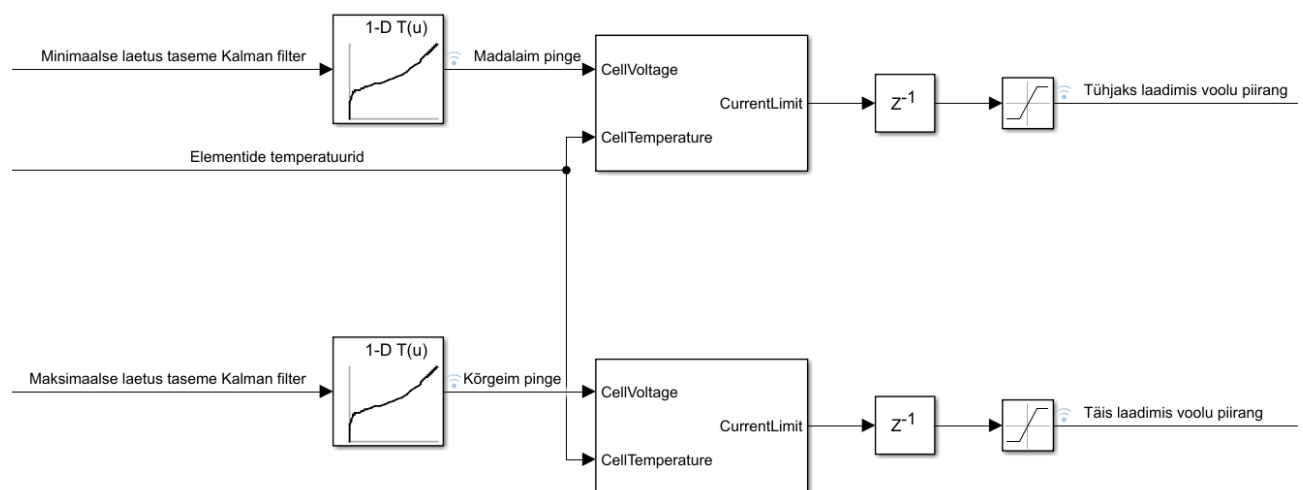


Joonis 20. Temperatuuri vea tuvastus

3.5 Lonkav režiimi funktsioon

Lonkavat režiimi on vaja, et elementidel ei oleks võimalik väljuda oma pinge ja temperatuuri töövahemikest. Kuna pinge ja temperatuur on tugevalt seoses elemendi koormamis profiiliga tuleb töövahemike äärealadel koormust vähendada, et jääda töövahemike vahele. Selleks sai akumudelile lisatud väljund voolu limiit plokid. Plokid saavad sisendiks elemendi temperatuurid ning Kalman filtrite minimaalse ja maksimaalse laetus taseme. Kuna minimaalse laetus taseme arvutamine käib läbi kõige madalama pingega elemendi saame laetus taseme ja pinge otsingutabeli abil leida elemendi avatud ahela pinge. Antud pinge saab anda sisendiks tühjakslaadimis voolu limiidi plokile. Plokile

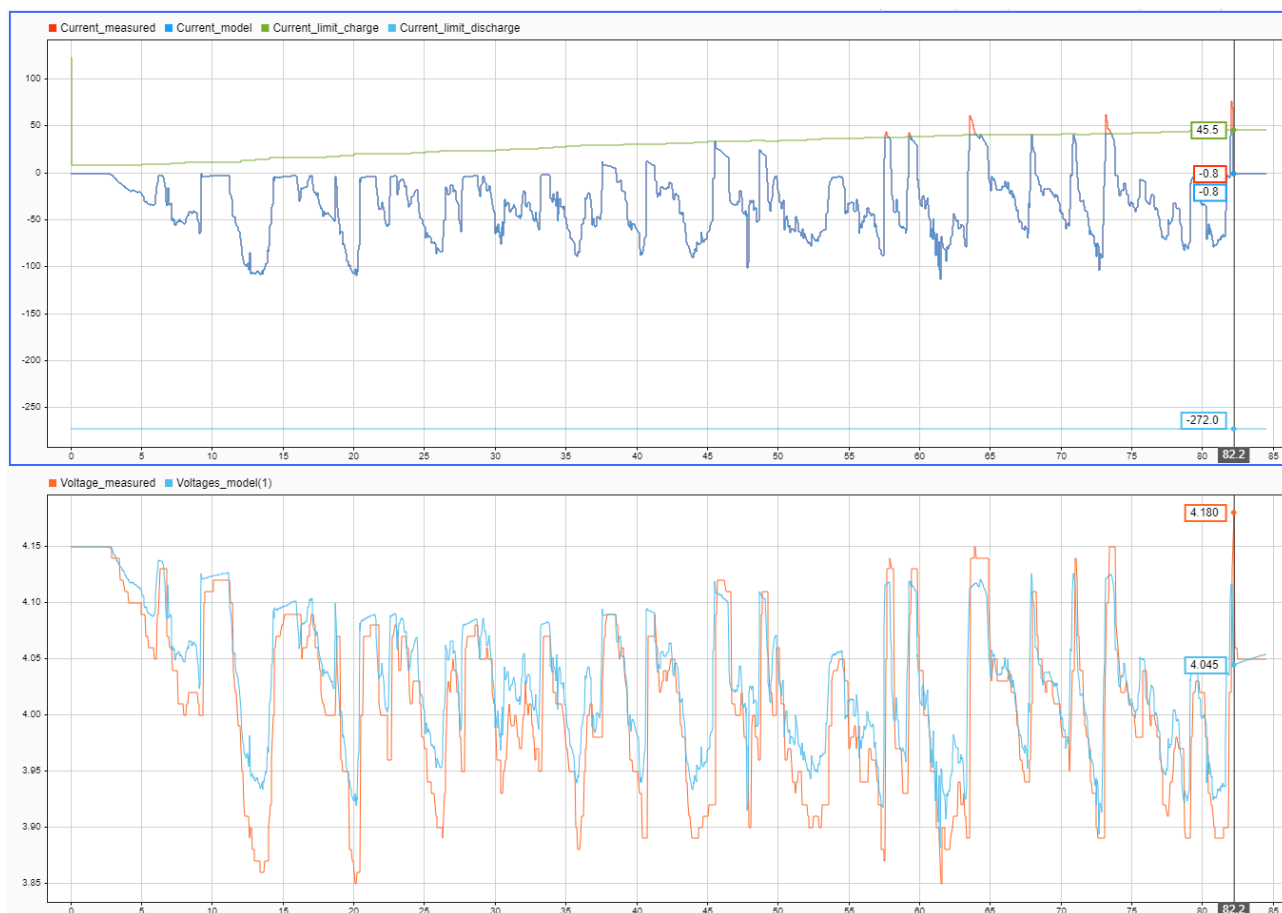
peab määrama kasutaja alam pinge piiri ja elemendi sisemise takistuse antud väärtuse juures. Tänu plokile teada olevale infole saab arvutada alampiiri ja hetke pinge erinevuse. Nüüd on plokil teada maksimaalne lubatud pingelang kuni alam limiidini ja elemendi sisemine takistus saab arvutada oomi seaduse järgi maksimaalse elemendi voolu millega pingelang jääks alla alumist limiiti. Lisaks saab plokiga piirata elemendi maksimaalset tühjaks laadimis voolu temperatuuriga. Selleks tuleb lisada temperatuuri ja voolupiiri vektor. Täpselt sama moodi töötab ka täislaadimis voolu piiraja. Sisendiks saab kõige kõrgema pingega elemendi avatud ahela pinge. Selle kaudu arvutab pingete erinevuse ülem limiidi ja elemendi pinge vahel. Seejärel saab leida maksimaalse täislaadimis voolu. Lisaks on mõlemale plokile lisatud saturatsiooni plokk, mis piirab voolu elemendi maksimaalse voolu limiidi järgi. Väljundvoolu limiidid saab saata juhtimissüsteemile, mis kasutab antud väärtusi voolude piiramiseks. (Joonis 21)



Joonis 21. Voolupiiraja plokid

Voolupiiraja valideerimiseks kasutati FEST23 võistluste andmeid. Sisendiks toodi Austria võistluse kestvussõidu voolud ja akupaki kõrgeima elemendi ping. Valideerides võrreldi võistluse andmete pinget ja voolu, mudeli pinget ja vooluga. Andmetest on näha, et Austria sõidu ajal käis elemendi pinget üle 4.166, mis teeb kogu akupaki pinget üle 600 V ja lülitab sõiduki kõrgepinge välja. Sel hetkel

oli sõiduki maksimaalne laadimisvool 76.2 A. Mudel piiras mudeli voolu 45.5 A peale. (Joonis 22)

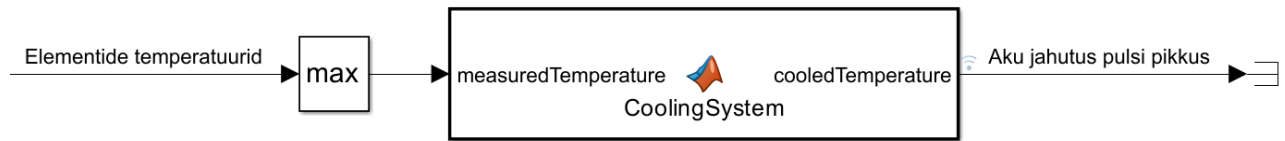


Joonis 22. Austria ja voolupiirajaga mudeli pingete ja voolu võrdlus

3.6 Jahutus kontroll funktsioon

FEST23 akupaki jahutuseks kasutatakse õhk jahutust. Jahutus ventilaatoreid juhitakse pulsi pikkus signaaliga. Akupaki efektiivsemaks kasutamiseks on oluline kasutada akupakki võimalikult kõrgel temperatuuril, et vähendada elemendi sisemist takistust. Selle saavutamiseks juhitakse jahutus ventilaatoreid vastavalt akupaki kõige kõrgema temperatuuriga elemendi järgi. Jahutuse juhtimis plokki sisendiks on elemendi temperatuurid. Nendest leitakse kõige kõrgem temperatuur. (Joonis 23) Vastavalt jahutussüsteemi jahutus deltale saab seadistada jahutus süsteemi töötamis vahemiku. Jahutussüsteemi delta on temperatuuri vahemik, mis on vajalik akupaki jahutamiseks. Näiteks kui jahutus delta on 12.5 °C saame leida punkti, millal tuleb panna jahutus süsteem maksimaalse võimsuse peale tööle. Teades, et temperatuuri voolupiiraja hakkab tööle 57.5 °C peal ja lisame varuteguri 1.2 jahutus deltale ehk 2.5 °C. Saame, et jahutus süsteem tuleks 100% peale tööle panna 42.5 °C ehk 315.6 K juures. Enne seda temperatuuri töötab jahutus 20% peal. Kui jahutus töötab

100% peal ja temperatuur langeb alla 37.5 °C ehk 310.6 K lülitub akupaki jahutus tagasi 20% peale.
(Joonis 24) Antud lahendusi soovitatakse ka kirjanduses. [4]



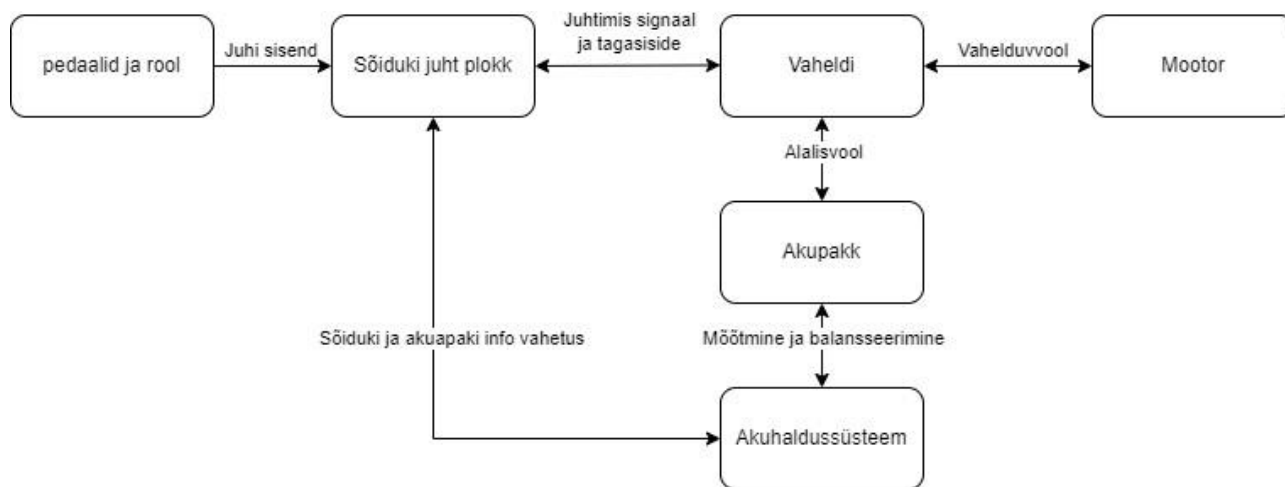
Joonis 23. Jahutus kontroll plokid



Joonis 24. Jahutuse PWM-i juhtimine mudelis

4 FEST 24 AKUHALDUSSÜSTEEMILE KOODI KIRJUTAMINE

Akuhaldus süsteem koosneb erinevatest elektroonika komponentidest, millega jälgitakse ja kontrollitakse akupaki tööd. Akuhaldus süsteem mõõdab elementide temperatuure ja pingeid kasutuse käigus ning teostab balansseerimist. Mõõtmiste põhjal määrab akuhaldussüsteem kasutus tingimused, millega ei ole võimalik kahjustada akupakki. Kasutus tingimused saab edastada, sõiduki juhtploki, mis juhib mootorite inverterid vastavalt juhi ja akuhaldus süsteemi sisenditele. (Joonis 25) Akupaki töö kontrollimine on oluline, et tagada ohutu ja stabiilne akupaki kasutus. [10]



Joonis 25. Elektrisõiduki juhtimis skeem

4.1 Akuhaldussüsteemi topoloogiad

Akuhaldussüsteemi saab jaotada kolmeks vastavalt topoloogiatele: tsentraliseeritud, modulaarne, hajutatud. Igal süsteemil on oma tugevused ja nõrkused. Akuhaldus süsteemi valikul tuleb arvestada akupaki suuruse, maksumuse, soovitud täpsuse ja kasutus tingimustega. [10]

Tsentraliseeritud akuhaldussüsteem kasutab ühte kontrolleri kogu akupaki peale. Kõikide elementide mõõtmine ja balansseerimine käib läbi ühe tsentraal kontrolleri. Antud topoloogia on kõige lihtsamini kasutatav ja odav väikeste akupakkide puhul, kus pole palju elemente. Suurte akupakkide puhul muutub süsteem kohmakaks ja suureks, kuna kõikide mõõtepunktide juhtmed tuleb vedada ühele kontrolleri. [10]

Modulaarne akuhaldussüsteem jagab kogu akupaki alam gruppidesse või moodulitesse. Elementide mõõtmine ja balansseerimine käib läbi alam gruppide jälgimis seadme. Seade saadab andmed

omakorda edasi juht kontrolleriile. Lahendus sobib hästi suurtele akupakkidele ja on lihtsasti muudetava suurusega. [10]

Hajutatud akuhaldussüsteem kasutab iga akupaki alam grupi või mooduli kohta ühte kontrolleri. Mõõtmised ja balansseerimine toimub igal alam grupil läbi oma kontrolleri. Kontrollerid suhtlevad omavahel läbi suhtlusvõrgu ja moodustavad tervikliku süsteemi. Antud lahendus on kõige keerukam ja kallim, kuid pakub kõige täpsemat juhtimist. [10]

4.2 Nõuded

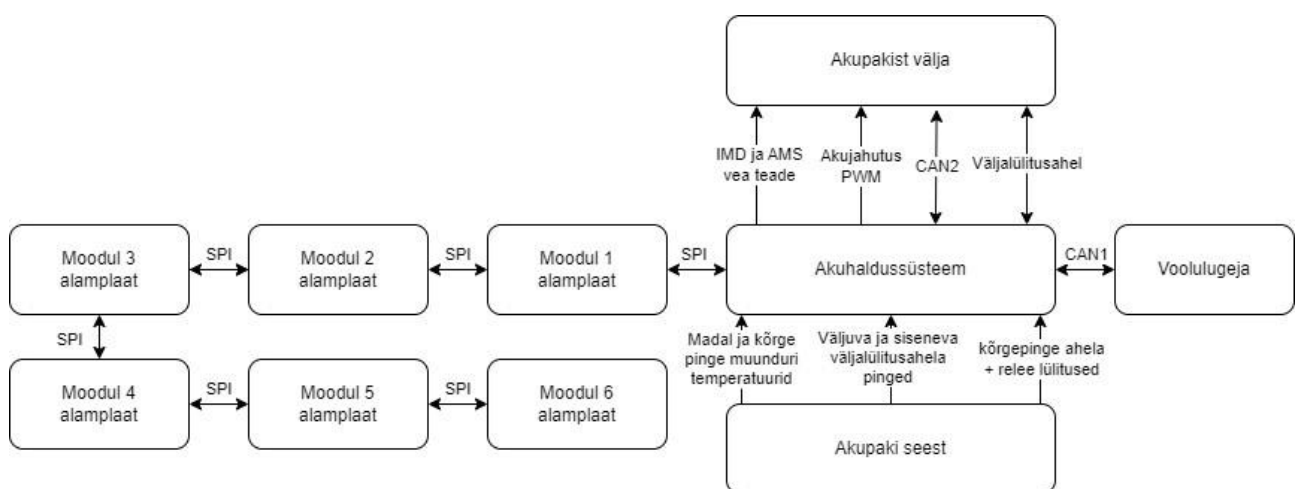
Akuhaldussüsteemi nõuded on enamjaolt paika pandud võistlussarja reeglite poolt, vajalike juhtfunktsioonide ja diagnostika lihtsustamiseks vajalike mõõtmis ahelatega. (Tabel 5)

Tabel 5. Akuhaldussüsteemi nõuded

Nõuded	Miks?
Akuhaldussüsteem peab mõõtma kõikide elementide pingeid, kõrgepinge voolu ja 30% elementide temperatuuri.	Võistlussarja reeglid
Akuhaldussüsteem peab välja lülitama kõrgepinge ahela katkestades väljalülitusahela, kui mõni elementidest on väljunud töö pinge või temperatuuri vahemikust. Pinge puhul 500 millisekundiga ja temperatuuri puhul 1 sekundiga.	Võistlussarja reeglid
Akuhaldussüsteem peab olema võimeline kuvama kõiki mõõtmistulemusi ühel vaatel arvutiga ühendades.	Võistlussarja reeglid
Laadimise ajal peab akuhaldussüsteem töötama ja lülitama välja laadija, kui esineb viga.	Võistlussarja reeglid
Saatma vea puhul välja AMS ja IMD vea teate.	Võistlussarja reeglid
Akupaki andmete sorteerimine ja kontrollimine.	Juhtimine
Akupaki laetus taseme ja alles jäänud mahutavuse arvutamine.	Juhtimine
Lonkav režiimi piirangute arvutamine ja akupaki jahutuse juhtimine.	Juhtimine
Juhtima akupaki jahutus ventilaatoreid.	Juhtimine
Lonkav režiimi voolupiirangute edastamine juhtimissüsteemile.	Suhtlus
Akupaki andmete kuvamine juhi näidikute plokis.	Suhtlus
Voolulugeja andmete sisse lugemine.	Suhtlus

Elemendi pingete ja temperatuuride sisse lugemine ning elementide balansseerimise juhtimine.	Suhtlus
Jälgima kõrgepinge ahela positiivse relee lülitusi.	Diagnostikaks
Jälgima madal ja kõrgepinge muunduri temperatuure.	Diagnostikaks
Mõõtma väljuvat ja sisenevat väljalülitusahela pinget.	Diagnostikaks

Akuhaldussüsteem kasutab kokku 3 suhtlusliini. FEST24 kasutatakse modulaarset akuhaldus süsteemi, kus on ülema ja alama topoloogiat. Alam plaatidega mõõdetakse paralleel ühenduste pinged ja temperatuure ning edastatakse need ülem plaadile. Alam plaadile on üles ehitatud balansseerimis ahel, mida juhitakse ülem plaadi käskudega. Alam plaate on iga mooduli kohta üks ja suhtlus käib läbi isoleeritud SPI liini. Voolulugejaga suhtlemiseks kasutatakse CAN liini pidi suhtlust. Voolulugeja edastab akuhaldussüsteemile akupaki kõrgepinge ahela pinge, voolu, võimsuse, sisenevat ja väljuvat energiat Wh. Andmeid saab kasutada akuhaldussüsteemi sisendina ja Kalman filtri valideerimiseks. Vormeliga suhtlemiseks kasutab akuhaldussüsteem vormeli üld CAN liini. CAN liini pidi edastatakse vormeli juhtimissüsteemile akuhaldussüsteemi lonkav režiimi piirangud. Vormeli juhi näidikuteploki kuvatakse akupaki laetus tase, minimaalne keskmine maksimaalne elemendi temperatuur ja pinge. Akuhaldussüsteemil on oma pulsi pikkuse modulatsioon (PWM) ahel, millega juhitakse akujahutus ventilaatoreid. Mõõdetakse ja kontrollitakse akupaki voolumuundurite temperatuure, väljuva ja siseneva väljalülitus ahela pingeid ning kõrgepinge ahela pea lülitite lülitusi diagnostika lihtsustamiseks. Väljalülitusahel saab alguse akuhaldussüsteemist. Akuhaldussüsteem peab isolatsioon mõõte seadme(IMD) või akuhaldussüsteemi(AMS) veapuhul katkestama väljalülitusahela. (Joonis 26)



Joonis 26. Akuhaldussüsteemi suhtlus skeem

4.3 Akuhaldussüsteemi kood

Lõputöö raames koostatakse kood, millega arvutatakse akupaki laetus taset ja alles jäänud mahutavust. Kontrollitakse sisse tulevaid temperatuuri ja pinge mõõtmisi ning vea puhul tuvastatakse see koos asukohaga. Vea tekkimise puhul antakse välja akuhaldussüsteemi vea teade. Temperatuuride ja pingete seast leitakse maksimaalsed, keskmised ja minimaalsed väärtused. Vastavalt akupaki temperatuurile juhitakse akupaki jahutus ventilaatoreid pulsi pikkusega. Juhitakse elementide balansseerimist vastavalt elementide pingete erinevusele. Arvutatakse akuhaldussüsteemi lonkav režiimi voolu piir väärtusi. Sisendina tulevad koodi genereerimis mudelisse 288 elemendi mõõtmis tulemused, 96 elemendi temperatuurid, voolulugeja voolutugevused ja balansseerimise lubamis signaal. Väljundina tuleb koodist akupaki pinge ja temperatuuri maksimaalne, keskmine ja minimaalne väärtus. Pinge ja temperatuuri alampiiri ja ülempiiri veateated koos asukohaga. Akuhaldus süsteemi vea teade. Akujahutuse juhtimis pulsi pikkused. Elementide balansseerimine aktiivne signaal koos juhtimis käskudega. Väljundisse antakse veel akupaki laetus tase, allesjäänud mahutavus ning täis ja tühjaks laadimis piirväärtused. (Lisa 6)

KOKKUVÕTE

Lõputöö raames sai koostatud elemendi mudel vastavalt testitud andmetele. Ehitati üles akupaki mudel koos akuhaldussüsteemi funktsioonidega. Aku haldussüsteemi laetustaseme arvutamiseks kasutatakse Kalman filtrit, mis leiab laetus taseme vastavalt elemendi mudeli parameetritele. Üheks peamiseks eesmärgiks mudeli koostamisel oli suurendada maksimaalset kasutatavat mahutavust samade aku elementidega. Mudeli põhjal saadi akupaki maksimaalseks mahutavuseks 7.1 kWh. Võrreldes FEST23 kestvussõitudel tarbitud 6-6.5 kWh on potentsiaalne mahutavus võit ideaal tingimustes uue aku haldussüsteemi juhtimisega 9-18%. Reaalne FEST24 mahutavus on 6.9 kWh, kui arvestada elementide tootmis erinevusi. Sellisel juhul oleks mahutavus võit 6-15%. Kogu mudeli täpsuse parandamiseks tuleks FEST24 elementide saabumisel testida elemente terve töötsükli ulatuses ja väljaspool neid piire. Tühjaks laadimistsükleid kuni pinge alam limiidini 2.7 V. Testimis piirkonna suurendamisega saaks juurde kasutatavat mahutavust. Tuleks vaadata, kui suurt mõju avaldab elemendile temperatuur. Tühjaks laadimis tsükleid teha erinevate elemendi töö temperatuuride juures. Lisaks tuleks kasutada elementide testimiseks täpsemaid mõõteseadmeid. Pinge mõõtmiseks tuleks kasutada Kelvini 4 juhtmega mõõtmis lahendust, et elemendi pinge mõõtmist ei mõjutaks mõõtejuhtmete takistus. Voolu mõõtmiseks tuleks kasutada shunti-põhist vooluandurit halli vooluanduri asemel. Akuhaldussüsteemile sai lisatud temperatuuri ja pinge vea tuvastus plokk koos vea asukoha näitamisega. Süsteemile lisati lonkav režiim, mis töötab elemendi laetus taseme ja sisemise takistuse põhjal. Elementide balansseerimiseks ehitati üles balansseerimis juhtplokk, mis võimaldab elementide maksimaalset pinge erinevust 10 mV. Aku jahutuse juhtimiseks ehitati üles jahutus plokk, mis annab väljundiks pulsi pikkuse signaali vastavalt elementide temperatuurile. Tulevikus võiks lisada akuhaldus süsteemile aku eluea hindamis funktsiooni. Täiendavalt genereeriti akuhaldussüsteemi mudeli funktsioonidest kood FEST24 akuhaldussüsteemile. Järgnevateks sammudeks on antud koodi funktsioonide kaupa integreerimine FEST23 akuhaldussüsteemile. FEST23 haldussüsteemil saab testida ja valideerida akuhaldussüsteemi funktsioonide tööd ning täpsust.

SUMMARY

The main purpose of the thesis was to design an accumulator management system model in Simulink for the FEST24 FS Team Tallinn formula car. The goal was to improve the accuracy of state of charge estimation and enhance the overall operation of the management system. The first part describes the properties of lithium-ion batteries and explains why a management system is necessary for these batteries.

The second part analyzes different battery models and their suitability for an accumulator management system. The Thevenin circuit-based battery model was chosen for the FEST 24 management system. This battery model was built in the Simulink application Simscape. The section also details the tests conducted to determine the parameters for the model and its validation.

The third part outlines the design process of the accumulator management system model. Describes the system functions requirements and development process. The main improvements were achieved with the Kalman filter, enhancing state of charge estimation accuracy to up to 1%. A LIMP mode was also added, which interacts with the state of charge and cell internal resistance.

The final part discusses code generation from Simulink and the overall tasks of the accumulator management system in FEST 24. The requirements were set by Formula Student rules and included management, communication, and troubleshooting needs.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] R. A. K. L. A. J. a. T. T. Suguna Thanagasundram, "researchgate," 11 2012. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/304345916_A_Cell_Level_Model_for_Battery_Simulation?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7InBhZ2UiOiJwdWJsaWNhdGlvbiIsInByZXZpb3VzUGFnZSI6bnVsbH19. [Accessed 20 11 2023].
- [2] D. Case, "fsaeonline," Formula SAE, 1996. [Online]. Available: <https://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=c4c5195a-60c0-46aa-acbf-2958ef545b72>. [Accessed 20 11 2023].
- [3] F. T. Tallinn, "formulastudent," Formula Student Team Tallinn, [Online]. Available: <https://www.formulastudent.ee/et/hooajad/>. [Accessed 20 11 2023].
- [4] A. Gibbs, Lithium Polymer Batteries, 2013.
- [5] R. Gogoana, "dspace," Massachusetts Institute of Technology, 2012. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/1721.1/74917>. [Accessed 2 12 2023].
- [6] "Formula Student Germany," 2023. [Online]. Available: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2024/rules/FS-Rules_2024_v1.1.pdf. [Accessed 04 12 2023].
- [7] A. devices, "Analog," [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC6811-1-6811-2.pdf>. [Accessed 2 12 2023].
- [8] T. H. S. K. A. J. Christian Campestrini, "Sciencedirect," 31 10 2016. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X16302031>. [Accessed 20 11 2023].
- [9] M. D. P. V. D. B. J. V. M. Noshin Omar, "ieeexplore," 13 10 2011. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6043010&casa_token=-_CZc4tWNagAAAAA:axNkOibvpu1dRkD0-dHOPt6OvhUEj7J7MtUu9vvZ94tmUXOEMuccOeUdFRTY0VPb6pag1uyYcnk&tag=1. [Accessed 06 12 2023].
- [10] C. S. R. R. A. R. K. R. S. p. S. J. M. J. M. Siva Ramkumar, "Hindawi," 13 5 2022. [Online]. Available: <https://downloads.hindawi.com/journals/amse/2022/3379574.pdf>. [Accessed 15 12 2023].

LISAD

Lisa 1. 3 Sigma sorteerimine

Lisa 2. Mudeli võrdlus Itaalia võistluste kestvussõiduga

Lisa 3. Mudeli võrdlus FSG võistluse kestvussõiduga

Lisa 4. Kalman filtri sisend pinged ning väljund laetus tasemed ja allesjäänud mahutavus.

Lisa 5. Elementide balansseerimine mudelis

Lisa 6. Akuhaldussüsteemi ülesehitus

Lisa 1. 3 Sigma sorteerimine

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB
1	Single module NO.	Voltage[V]	Impedance[mΩ]	Capacity[mAh]	max.	weight	OCV	under current voltage	voltage drop	internal resistance	one difference	Column			Voltage [V]	OCV [V]	Differen	IR- [mΩ]	Internal Resisten	Capacit	Mass [g]	Wirta (mA)					
2	10-1	3.827	1.620	7664.000	126.00	11.00	3.819	3.649	0.17	5.606666667	0.0037	1	Analysis	3.813	3.804	0.003	1.51	5.23	6979.0	124.6	10.20						
3	10-10	3.824	1.620	7664.000	126.00	10.80	3.817	3.651	0.166	5.633333333	0.0054	2	MIN:	3.825	3.820	0.015	1.78	6.60	7185.0	127.2	11.40					eliminated	
4	10-11	3.821	1.620	7664.000	126.00	10.80	3.817	3.641	0.176	5.866666667	0.0051	3	Average:	3.821	3.816	0.005	1.60	5.74	7080.9	126.6	10.90					168	
5	10-12	3.822	1.620	7664.000	126.00	11.00	3.818	3.641	0.176	5.866666667	0.0052	4	Standard deviat	0.002	0.002	0.001	0.03	0.19	39.9	0.4	0.14					176	
6	10-13	3.822	1.620	7664.000	126.00	10.80	3.817	3.644	0.173	5.606666667	0.0052	5	Standard deviat	0.002	0.002	0.001	0.03	0.19	39.9	0.4	0.14					175	
7	10-14	3.823	1.620	7664.000	126.00	10.80	3.818	3.644	0.178	5.833333333	0.0044	6	AVG + 2S	3.820	3.822	0.007	1.69	6.32	7200.8	126.9	11.33					181	
8	10-15	3.823	1.620	7664.000	126.00	10.80	3.818	3.647	0.171	5.606666667	0.0046	7	AVG - 2S	3.816	3.811	0.001	1.57	6.17	6967.1	124.3	10.48					173	
9	10-16	3.824	1.620	7664.000	126.00	10.80	3.818	3.645	0.178	5.866666667	0.0043	8															
10	10-17	3.824	1.620	7664.000	126.00	11.0	3.817	3.65	0.167	5.866666667	0.0054	9															
11	10-18	3.824	1.620	7664.000	126.00	11.00	3.817	3.644	0.167	5.866666667	0.0051	10															
12	10-19	3.824	1.620	7664.000	126.00	10.80	3.818	3.644	0.173	5.766666667	0.0051	11															
13	10-2	3.822	1.596	7664.000	126.00	10.80	3.817	3.644	0.174	5.606666667	0.0051	12															
14	10-20	3.822	1.596	7664.000	126.00	10.80	3.817	3.647	0.167	5.606666667	0.0053	13															
15	10-21	3.821	1.596	7664.000	126.00	11.0	3.817	3.647	0.17	5.606666667	0.0051	14															
16	10-22	3.824	1.596	7664.000	126.00	10.80	3.818	3.647	0.171	5.606666667	0.0044	15															
17	10-23	3.822	1.570	7664.000	126.00	10.80	3.818	3.643	0.175	5.833333333	0.0042	16															
18	10-24	3.824	1.597	7664.000	126.00	10.80	3.818	3.639	0.178	5.966666667	0.0044	17															
19	10-4	3.822	1.613	7664.000	126.00	10.80	3.818	3.642	0.176	5.833333333	0.0043	18															
20	10-4	3.822	1.607	7664.000	126.00	10.80	3.818	3.642	0.176	5.866666667	0.0043	19															
21	10-5	3.822	1.609	7664.000	126.00	10.80	3.818	3.642	0.176	5.833333333	0.0042	20															
22	10-6	3.828	1.620	7664.000	126.00	10.80	3.818	3.642	0.176	5.866666667	0.0046	21															
23	10-7	3.825	1.620	7664.000	126.00	10.80	3.818	3.648	0.17	5.606666667	0.0046	22															
24	10-8	3.822	1.596	7664.000	126.00	10.80	3.817	3.642	0.175	5.833333333	0.0052	23															
25	10-9	3.820	1.596	7664.000	126.00	10.80	3.818	3.642	0.155	6.433333333	0.0043	24															
26	10-9	3.821	1.604	7664.000	126.00	10.80	3.818	3.647	0.158	5.6	0.0048	25															
27	10-10	3.828	1.596	7664.000	126.00	11.0	3.815	3.647	0.158	5.6	0.0048	26															
28	10-11	3.820	1.596	7664.000	126.00	11.00	3.815	3.644	0.171	5.7	0.0043	27															
29	10-11	3.822	1.596	7664.000	126.00	11.00	3.816	3.645	0.167	5.606666667	0.0042	28															
30	10-10	3.819	1.596	7664.000	126.00	10.80	3.815	3.645	0.175	5.606666667	0.0051	29															
31	10-11	3.819	1.596	7664.000	126.00	10.80	3.815	3.639	0.175	5.833333333	0.0051	30															
32	10-12	3.819	1.597	7664.000	126.00	10.80	3.815	3.642	0.173	5.766666667	0.0056	31															
33	10-13	3.819	1.597	7664.000	126.00	11.00	3.812	3.634	0.178	5.833333333	0.0056	32															
34	10-14	3.819	1.603	7664.000	126.00	11.00	3.815	3.642	0.173	5.766666667	0.0040	33															
35	10-15	3.814	1.603	7664.000	126.00	11.00	3.808	3.648	0.16	5.333333333	0.003	34															
36	10-16	3.8196	1.580	7664.000	126.00	11.00	3.815	3.646	0.159	5.633333333	0.0046	35															
37	10-17	3.8197	1.580	7664.000	126.00	11.0	3.815	3.647	0.158	5.6	0.0047	36															
38	10-18	3.8197	1.580	7664.000	126.00	11.0	3.815	3.631	0.184	6.133333333	0.0047	37															
39	10-19	3.8192	1.580	7664.000	126.00	10.80	3.814	3.637	0.187	6.066666667	0.0052	38															
40	10-20	3.8192	1.580	7664.000	126.00	10.80	3.814	3.634	0.175	5.833333333	0.0052	39															
41	10-20	3.819	1.580	7664.000	126.00	10.80	3.814	3.628	0.154	5.966666667	0.0038	40															
42	10-21	3.819	1.580	7664.000	126.00	10.80	3.814	3.643	0.158	5.606666667	0.0038	41															
43	10-22	3.819	1.570	7664.000	126.00	11.00	3.814	3.648	0.158	5.633333333	0.0037	42															
44	10-23	3.819	1.586	7664.000	126.00	10.80	3.814	3.641	0.163	5.433333333	0.0046	43															
45	10-24	3.8192	1.600	7664.000	126.00	10.80	3.814	3.641	0.173	5.766666667	0.0052	44															
46	10-13	3.8195	1.590	7664.000	126.00	10.80	3.815	3.642	0.173	5.606666667	0.0057	45															
47	10-14	3.8197	1.590	7664.000	126.00	10.80	3.815	3.645	0.17	5.606666667	0.0057	46															
48	10-14	3.8191	1.590	7664.000	126.00	10.80	3.814	3.64	0.174	5.6	0.0051	47															
49	10-14	3.8194	1.590	7664.000	126.00	10.80	3.814	3.64	0.176	5.866666667	0.0038	48															
50	10-15	3.8194	1.600	7664.000	126.00	11.40	3.815	3.643	0.172	5.733333333	0.0044	49															

Mass

OCV difference

Mahitavus

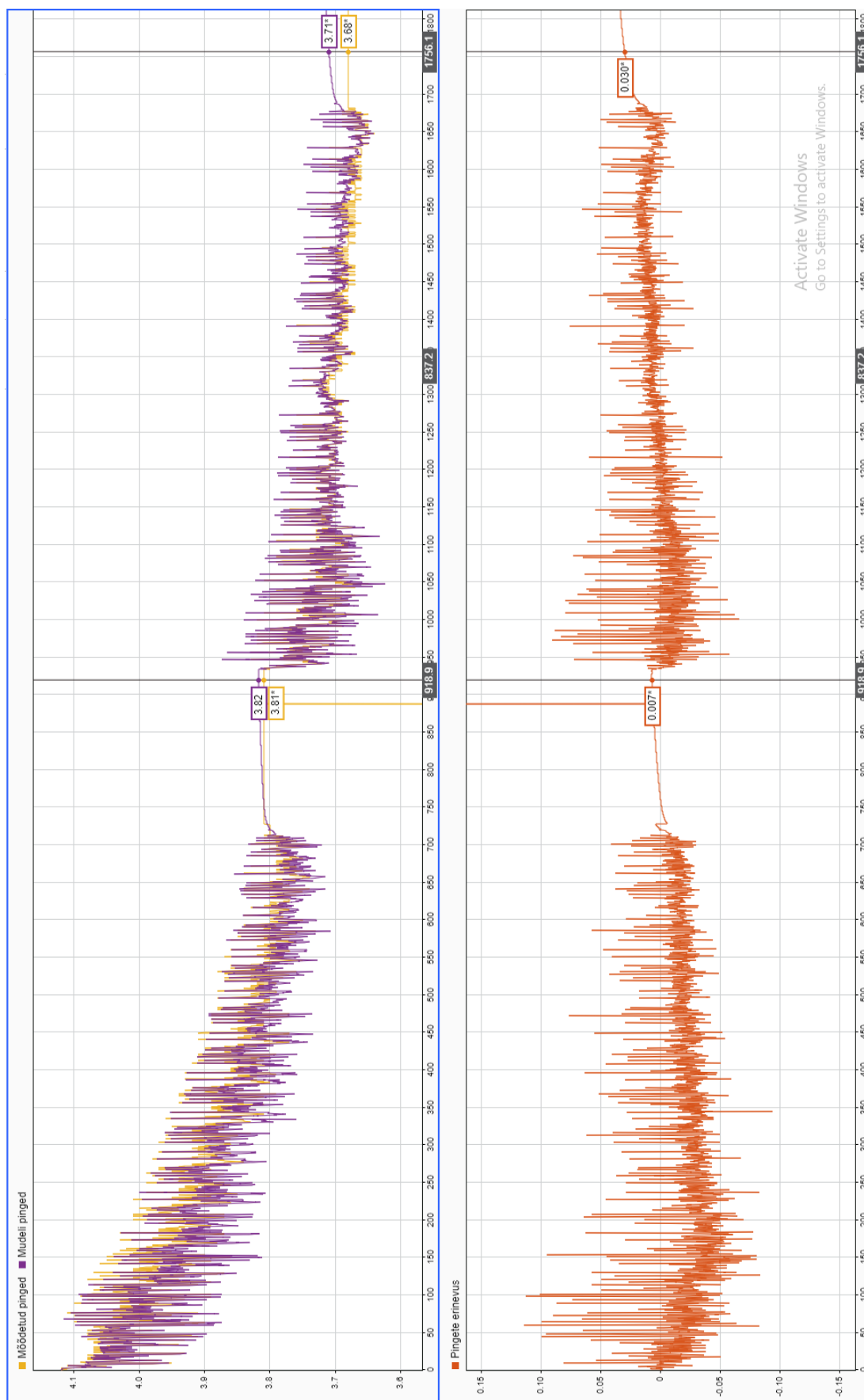
Sisetalistus

Impedance

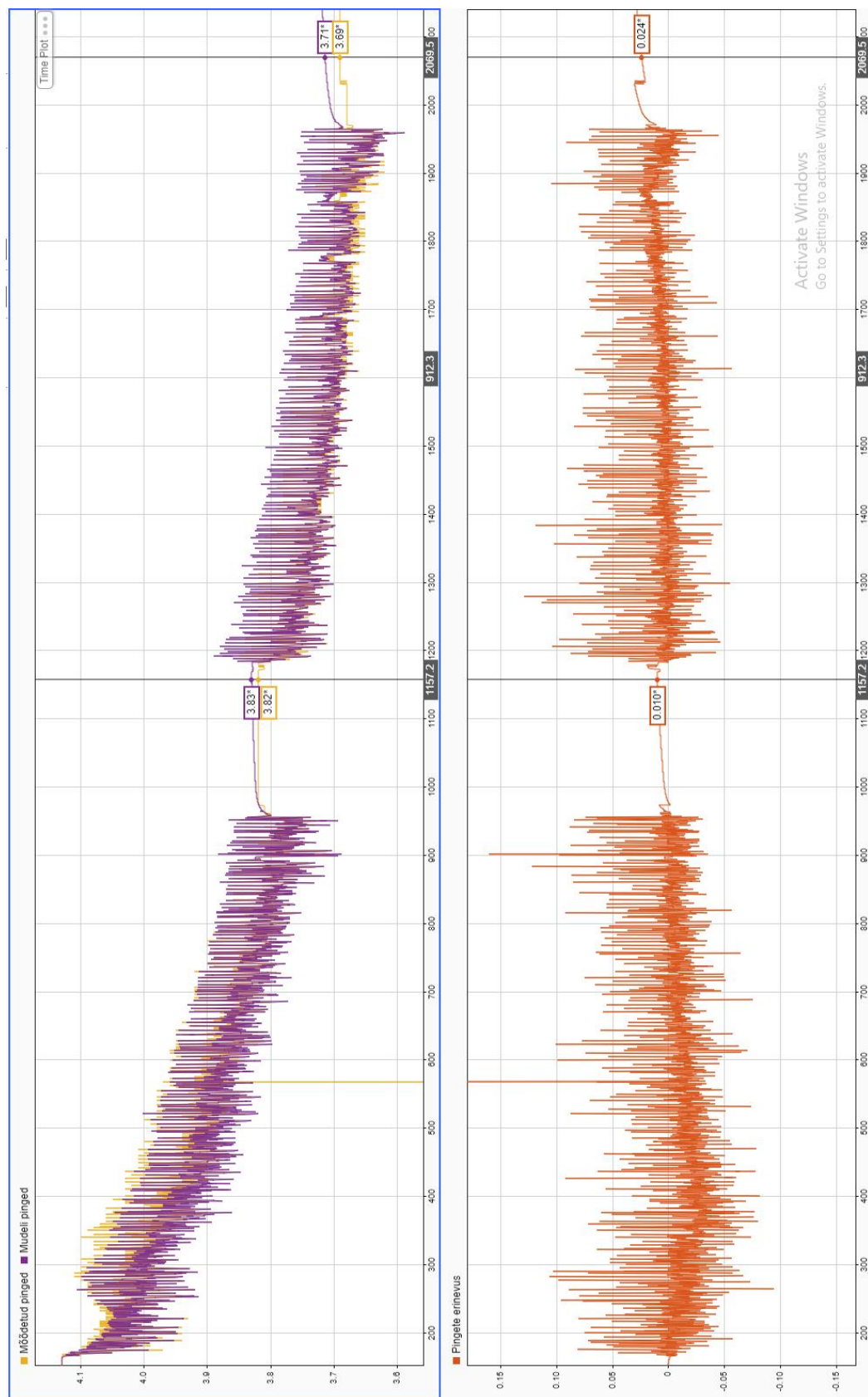
Analysis

Analysis	Min	Max	Average	Standard deviat	AVG + 2S	AVG - 2S
Voltage [V]	3.813	3.825	3.821	0.002	3.820	3.816
OCV [V]	3.804	3.820	3.816	0.002	3.822	3.811
Differen	0.003	0.015	0.005	0.001	0.007	0.001
IR- [mΩ]	1.51	1.78	1.60	0.00	1.69	1.57
Internal Resisten	5.23	6.60	5.74	0.04	6.32	5.17
Capacit	6979.0	7185.0	7080.9	39.9	7200.8	6967.1
Mass [g]	124.6	127.2	126.6	0.4	126.9	124.3
Wirta (mA)	10.20	11.40	10.90	0.18	11.33	10.48

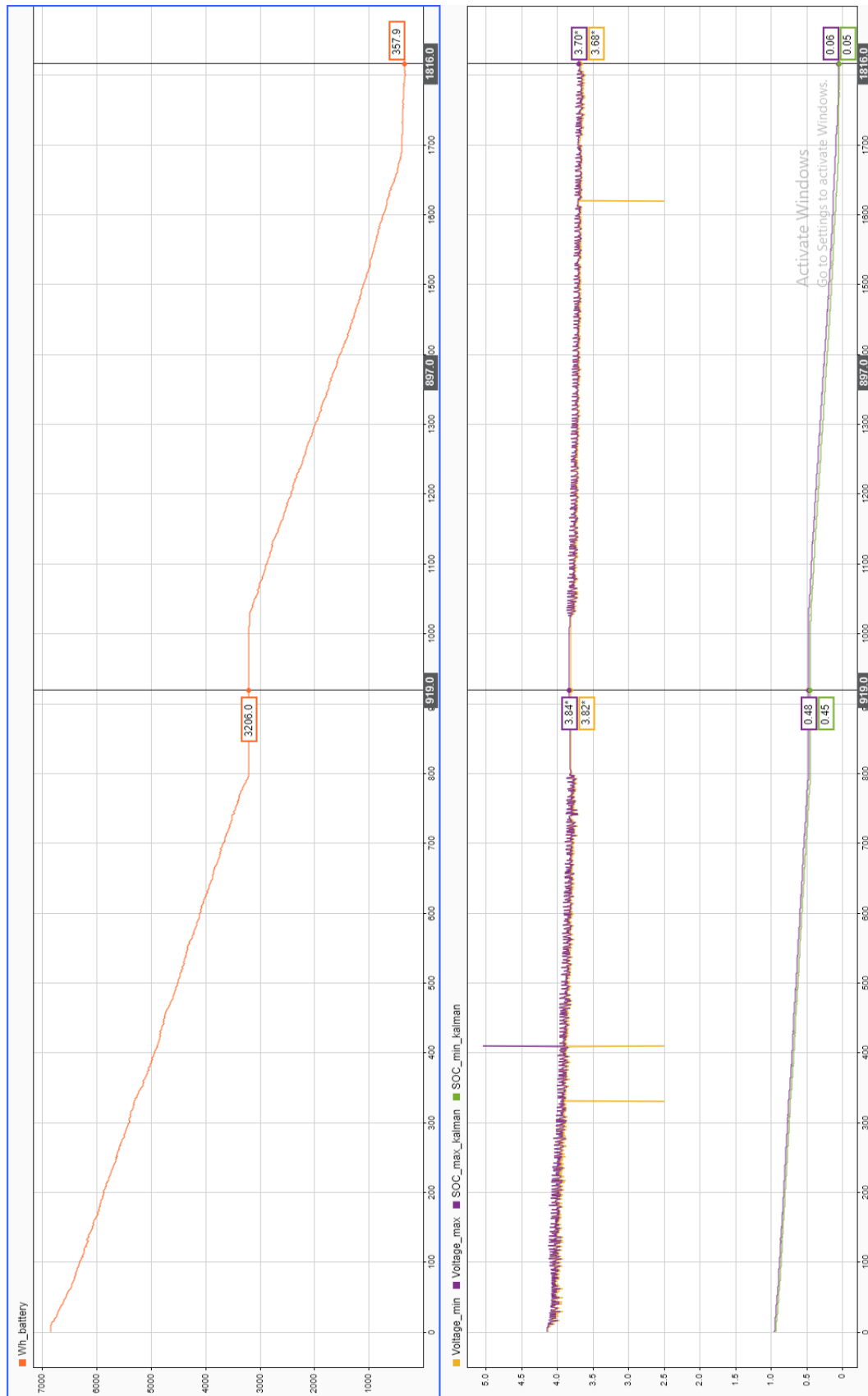
Lisa 2. Mudeli võrdlus Itaalia võistluste kestvussõiduga



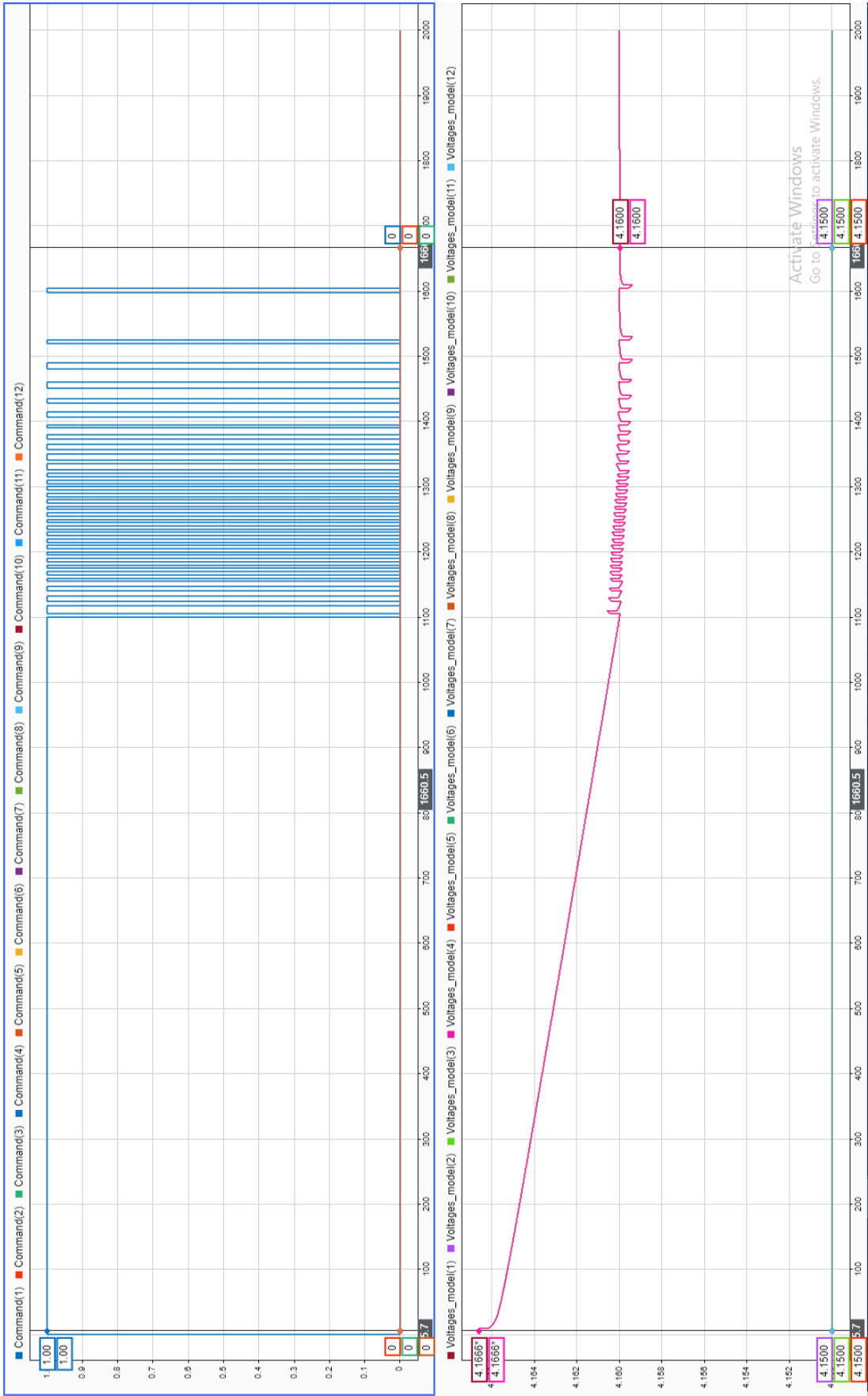
Lisa 3. Mudeli võrdlus FSG võistluse kestvussõiduga



Lisa 4 Kalman filtri sisend pinged ning väljund laetustasemed ja allesjäänud mahutavus.



Lisa 5. Elementide balansseerimine mudelis



Lisa 6. Akuhaldussüsteemi ülesehitus

