



Andrei Romanov

AKU TESTSTENDI ARENDUS

LÕPUTÖÖ

Tehnikainstituut
Elektritehnika eriala
Juhendaja: Andrei Rudz

Tallinn 2024

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Andrei Romanov

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud

teose

Aku teststendi arendus

1) reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada ja teha üldsusele kättesaadavaks

Tallinna Tehnikakõrgkooli digiarhiivi DSpace kaudu;

2) reprodutseerimiseks pärast piirangu lõppu juhul, kui instituudi direktori korraldusega on

kehtestatud lõputöö avaldamisele tähtajaline piirang.

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

andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest

tulenevaid ega muid õigusi.

Autorideklaratsioon

Mina, Andrei Romanov

tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste

autorite, sh juhendaja ja iseenda varasematele teostele on viidatud õiguspäraselt.

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

(allkirjastatud digitaalselt)

Juhendaja Andrei Rudz

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele.

(allkirjastatud digitaalselt)

Lõputöö on kaitsmisele lubatud instituudi direktori korraldusega.

(allkirjastatud digitaalselt)

(kuupäevad digiallkirjades)

SISUKORD

LÜHENDID.....	6
SISSEJUHATUS.....	7
1. ELEKTRIRATTA JA TESTALUSE AKU TUTVUSTUS.....	8
1.1 Elektriratas.....	8
1.2 Aku ehitus.....	8
1.2 Akuhaldussüsteemi ülesanded ja funktsionaalsus.....	9
2. AKU TESTIMINE.....	12
3. TESTSTENDI LAHENDUS.....	14
3.1 Juhtseade.....	16
3.2 ST-Link.....	18
3.3 CAN adapter.....	19
3.4 IVT.....	20
3.5 Juhtimismoodul.....	22
3.6 Tühjendamise moodul.....	28
3.7 Laadimise moodul.....	32
4. TESTSTENDIGA AUTOMAATNE TESTIDE LÄBIVIIMINE.....	33
KOKKUVÕTE.....	36
SUMMARY.....	37
VIIDATUD ALLIKAD.....	38
LISAD.....	40
Lisa 1. Stendi kasutamise töövoogi diagramm.....	41
Lisa 2. Teststendi hieraarhiline elektriskeem.....	42
Lisa 3. Juhtseadme GPIO signaalid.....	43
Lisa 4. Juhtimismooduli elektriline skeem.....	44

Lisa 5. Aku tühjendamise testi plokk skeem.....	45
---	----

LÜHENDID

BMS – Battery Management System

CAN – Controll Area Network

CC – Constant Current

CV – Constant Voltage

DCDC – Alalispinge muundur

DIP – Dual in-line Package

GPIO – General Purpose Input Output

IoT – Internet of Things

IVT – Mõõteseadme lühendatud nimetus

RP – RaspberryPi

SOA – Safe Operating Area

SoC – State of Charge

SSH - The Secure Shell protocol

SISSEJUHATUS

Autor on läbinud diplomipraktika ettevõttes, mis tegeleb elektrirataste ja nende akude arendamise ning tootmisega. Akude testimine moodustab olulise etapi nii arendus- kui ka tootmisprotsessis. Käesolev diplomitöö keskendub teststendi väljatöötamisele akude testimiseks. Töö eesmärk on lahendada akude testimisega seotud probleeme, mis esinevad töö kirjutamise hetkel. Peamised probleemid seisnevad testimise pikaajalisuses, mõningates olukordades keerukuses ning inimefaktori suures mõjus testide läbiviimisel.

Loetletud probleemid tulenevad sellest, et testid tuleb teha manuaalselt ning mõnel juhul puudub sobiv testseadmestik osade testide läbiviimiseks. Olemasolevat akude testimise protsessi soovitakse optimeerida mitmel viisil. Esiteks, testimisprotsessi lihtsustamine ja testimisele kuluvat aega vähendamine võimaldaksid kiirendada ja parendada akuarendamise protsessi. Teiseks, akude tootmise etapis testimise kiirendamine võimaldaks suurendada akude tootmiskahtu. Kolmandaks, negatiivse inimefaktori mõju testimisel eemaldamine vähendaks vigade tekkimise tõenäosust, mis omakorda aitaks kaasa akude kvaliteedi tõusule.

Teststendi abil testimise automatiseerimine võimaldaks optimeerida testimisprotsessi ja lahendada olemasolevad probleemid. Diplomitöö teema valimise etapis uuriti ja selgitati välja, et turul saadavate aku teststendide hulgast ei leidu stendi, mis suudaks teostada kõiki vajalikke teste. Diplomitöö ülesanne on välja töötada ettevõttele automaatse teststendi riistvaralahendus akude testimiseks. Teststend peab olema võimeline läbi viima ettevõtte poolt määratud testid automaatrežiimis.

Esimeses peatükis kirjeldatakse teststendi põhiülesandeid, ehitust ning funktsionaalsust. Teises peatükis analüüsitakse ettevõtte poolt määratud teste ja nende läbiviimise protsessi ning selgitatakse välja, millised vajadused tekivad testimise käigus. Kolmandas peatükis töötatakse välja teststendi kontseptsioon ja elektriline disain. Neljandas peatükis antakse ülevaade stendiga tehtavatest testidest ja nende läbiviimisest.

1. ELEKTRIRATTA JA TESTALUSE AKU TUTVUSTUS

1.1 Elektriratas

Tegemist on täiselektrilise jalgrattaga (Joonis 1, vasakul), mille eesmärk on suurte kaubamahtude vedamine [1]. Autor kasutab terminit "elektriratas" veoelektrijalgratta asemel. Antud elektriratta eripära võrreldes paljude teiste elektriratastega seisneb selles, et pedaalid ei ole mehaanilise ülekandega otse rattaga ühendatud. Selle asemel on need ühendatud juhtimiselektronikaga läbi generaatori, mis edastab signaali juhtimiselektronikasse. Juhtimiselektronika omakorda juhib mootori kontrollereid, mis panevad rattamootorid tööle.



Joonis 1. Ettevõtte elektriratas ja aku: *vasakul - elektriratas, paremal - aku*

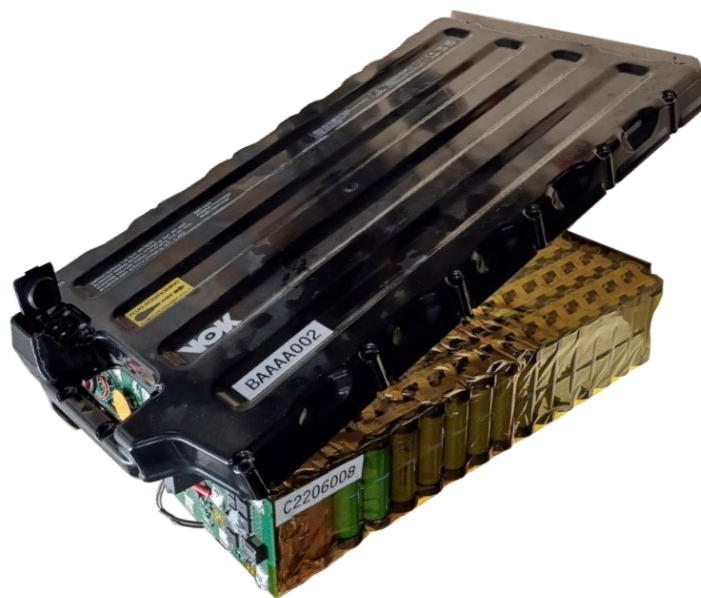
Elektriratas saab toidet paradaakult (Joonis 1, paremal), mida edaspidi nimetatakse "akuks". Akul on kaks peamist ülesannet elektriratta juures. Esiteks, aku varustab elektriratta elektronikat ja jõuülekannet (mootoreid, mootorite juhtimis kontrollereid, muud juhtimiselektronikat, kasutajaliidest, välisvalgustust jne) elektriga. Teiseks, aku tarbib elektrienergiat, mis tekib regenereerivast pidurdamisest. Elektriratas ja aku on projekteeritud niiviisi, et elektriratta kasutaja saaks akut lihtsalt vahetada. Aku on võimalik laadida nii elektriratta kaudu kui ka ühendades laadija otse akuga [2].

1.2 Aku ehitus

Aku koosneb kahest põhikomponendist: elektrienergiakandjast ja akuhaldussüsteemist. Elektrienergiakandja on aku toiteallikas, mis koosneb omavahel ühendatud individuaalsetest liitiumioonakuelementidest [3]. Akuelemendid on ühendatud omavahel 12S16P konfiguratsioonis, mis tähendab, et neid on kokku 12 rööbiti ühendatud (s-

ühendus) ja iga selline rühm sisaldab 16 akuelementi paralleelselt ühendatud (p-ühendus) [4]. Need kuusteist akuelementi moodustavad rööbiti ühendatud rühma, mida nimetatakse rööpahelaks. Kaksteist rööpahelat on omakorda ühendatud jadamsi. Selliselt omavahel ühendatud akuelemendid moodustavad aku elektrienergiakandjat - *cell pack'i* - nominaalpingega 43,2 V ja nominaalmahutavusega 62 Ah [4].

Akuhaldussüsteem, mida tuntakse ka kui BMS (*Battery Management System*), on elektroonikaplaad, mis paikneb *cell pack'i* ja elektrienergia tarbija vahel ning vastutab aku töö reguleerimise eest. Testaluse aku BMS on spetsiaalne lahendus, mis on ettevõttega välja töötatud.



Joonis 2. Aku lahtisel kujul

BMS ühendub *cell pack'i* ja iga selle rööpahela külge ning mõlemad paiknevad aku korpuse sees (Joonis 2). Aku korpuse külge on kinnitatud toitepesa, mille kaudu elektriratas või laadija ühendatakse akuga. Toitepesa juhtmed on ühendatud BMS-iga. Toitepesal on kokku kuus kontakti: aku väljund (positiivne ja negatiivne), kaks signaalliini välisseadmetega suhtlemiseks ning kaks kontakti signaaltakistuse ühendamiseks.

1.2 Akuhaldussüsteemi ülesanded ja funktsionaalsus

Kogu aku funktsionaalsus on tagatud BMS-iga. Tüüpiliste BMS-i ülesannete hulka kuuluvad aku töö turvalisuse tagamine ja aku mahutavuse optimeerimine. Lisaks nendele

tavalistele ülesannetele omab testaluse aku BMS ka täiendavaid ülesandeid, mis tulenevad elektriratta eripärast.

Aku töö turvalisuse tagamiseks peab BMS tagama aku toimimise tarkvaraga määratud turvalises tööpiirkonnas, mida nimetatakse SOA-ks (*Safe Operating Area*) – see hõlmab kindlat pinge-, voolu- ja temperatuurivahemikku. Aku töötamine SOA piirkonnast väljaspool võib vähendada aku eluiga ning põhjustada selle pöördumatut riknemist ning äärmuslikel juhtudel ka süttimist või plahvatust. BMS jälgib aku parameetrite väärtusi, sealhulgas cell pack'i ja iga rööpahela pingeid, cell pack'i voolu ja temperatuuri. Kui mõõdetud väärtused ületavad kehtestatud piirväärtusi, piirab BMS aku tühjenemist ja laadimist, kaitstes akut üle- ja alapingest, liigvoolust, lühisest ning ülekuumenemisest [5].

Aku mahutavuse optimeerimiseks peab BMS tagama kõikide akuelementide pinge võrdsustamise. Kuna *cell pack*'i rööpahelad ei tühjene ega lae alati ühtlaselt, tekib korduva tühjenemise ja laadimise käigus olukord, kus erinevatel rööpahelatel on erinevad pinged. Kui üks rööpahel saavutab maksimaalse lubatud pingetaseme laadimisel, piirab BMS selle laadimist ja teised rööpahelad jäävad maksimaalse pingega laadimata, mis võib põhjustada aku mahutavuse vähenemist. Aku maksimaalse mahutavuse võimaldamiseks teostab BMS rööpahelate pingete tasakaalustamist, mis võimaldab kasutada aku täielikku mahutavust [5].

Kuna elektriratta aku on kergesti välja vahetatav ning seda võib ühendada nii otse elektriratta külge kui ka laadijaga, võib aku olla mitmes funktsionaalses olekus: välja lülitatud olekus, eellaadimis-, tühjenemis- ja laadimisolekus ning veaolekus. Igas olekus peab aku täitma erinevaid ülesandeid. Ettevõtte aku BMS peab suutma tuvastada aku oleku ning juhtima aku väljundit vastavalt sellele.

Aku peab olema välja lülitatud olekus siis, kui see pole ühendatud elektrirattaga ega laadijaga. BMS peab tuvastama, et aku on ühendamata, ning avama väljundi juhitud transistorid, et takistada aku elektrienergia tarbimist. See on oluline aku ohutu käsitlemise ja kasutamise tagamiseks.

Aku ühendamisel elektrirattaga peab see läbima eellaadimise oleku ning seejärel tühjenemise oleku. Kõigepealt peab BMS tuvastama, et aku on elektriratta külge ühendatud. Eellaadimise olekus peab BMS tagama aku väljundi pinge sujuva tõusu, mis tähendab eellaadimist. Selle eesmärk on vältida sädemete teket aku ja elektriratta ühendusklemmide vahel, mis võib tekkida elektriratta süsteemi mahtuvuslike

komponentidega algselt suure voolutarbimise tõttu. Lisaks kontrollib BMS, et elektriratta süsteemis pole lühiseid. Kui elektriratta elektrisüsteem on lügistatud, eellaadimine ei õnnestu ning BMS-i väljundi transistorid ei sulgu, mis väldib aku lühisega ühendamist. Kui eellaadimine on edukas, peab aku minema tühjenemise olekusse ning BMS peab sulgema väljundi juhtivad transistorid. Seejärel saab elektriratas tarbida akust elektrienergiat, mis on vajalik tema töötamiseks ja sõitmiseks. Aku tühjenemisel, BMS veendub, et aku töötab määratud SOA-s.

Laadija ühendamisel akuga peab see minema laadimise olekusse. Laadija võib olla ühendatud akuga otse või elektriratta kaudu. Mõlemal juhul peab BMS tuvastama laadija ühendamise ja seejärel juhtima BMS-i laadimise transistorid kinni, et võimaldada akul laadijast voolu vastu võtta ja laadimisprotsessi alustada. Lisaks sellele, aku laadimise olekus peab toimuma ka *cell pack'i* rööpahelate tasakaalustamine, et tagada iga akueleменти ühtlane laadimine.

BMS peab pidevalt jälgima ja hindama aku seisukorda, tagades, et see oleks rahuldav ning et aku töötamine toimuks kehtestatud SOA-s. Kui BMS tuvastab akul probleemi või SOA-st väljumise, tuleb aku viia veaolekusse. Aku veaolekus piirab BMS laadimist ja tühjenemist, eesmärgiga kaitsta akut võimalike kahjustuste eest, ning indikeerib täpsema probleemi programmi sisese vastava veakoodi abil.

Lisaks BMS hindab aku laadimistaseme ehk SoC-i (*State Of Charge*) ja edastab seda informatsiooni elektriratta kasutajaliidesse CAN-võrgu (*Control Area Network*) kaudu. Kogu aku kohta käiv teave, sealhulgas SoC, saadetakse samuti CAN-võrgu kaudu IoT-seadmesse, mis omakorda edastab informatsiooni ettevõtte serverisse.

Peatükis kirjeldatud aku funktsionaalsus tagab aku õige, tõhusa ja turvalise töö. BMS-i kaudu kõigi eespool mainitud ülesannete täitmine on kriitiline aku nõuetekohaseks toimimiseks. Akude testimine on oluline, et tagada nende korrektne töö. Järgmises peatükis kirjeldatakse aku testimise protsessi ja sellega seotud vajadusi.

2. AKU TESTIMINE

Aku on elektriratta oluline ja vastutusrikas komponent. Ettevõttes kontrollitakse aku toimimist nii arendamise kui ka tootmise käigus. Arendusprotsessis on testimise eesmärk tagada, et välja töötatud lahendus toimib vastavalt ettenähtud töötingimustele ning täidab kõik vajalikud ülesanded. Tootmisprotsessis on testimise eesmärk veenduda, et tootmisliinilt väljunud valmis akud ei sisalda defekte ega puudusi ning on valmis ekspluateerimiseks.

Aku funktsioneerimise kontrollimiseks viiakse läbi funktsionaalsed testid, mis hõlmavad akude testimist erinevates olukordades ja funktsioonide toimimise kontrollimist. Igas olukorras peab aku saavutama õige oleku ning BMS peab täitma vastavad ülesanded.

Aku funktsionaalne testimine koosneb mitmest ettevõtte poolt määratud spetsiaalsest testist, mis on suunatud konkreetse aku funktsionaalsuse kontrollimisele. Iga test hõlmab akuga teatud tegevuste läbiviimist, aku reaktsioonide jälgimist ning seejärel nende hindamist. Kui aku reaktsioon vastab ootustele, siis loetakse test edukaks. Vastasel juhul loetakse test läbikukkunuks.

Testidega ettenähtud tegevuste hulka kuuluvad:

- BMS-ile tarkvara üles laadimine;
- elektriratta ja laadija ühendamine koos signaaltakistitega ja ilma nendeta;
- aku tühjendamine ja laadimine.

Aku reaktsiooni moodustavad:

- aku väljundi pinget ja voolu muutmine;
- BMS programmeerimisest väärtuste muutmine;
- BMS-iga CAN võrgu kaudu sõnumite saatmine.

Diplomitöö kirjutamise ajal viidi kõik testid läbi manuaalselt, kus inimene pidi teostama kõik ettenähtud tegevused, jälgima ja hindama aku reaktsiooni ning järeldama, kas test on edukalt läbitud ning kas aku funktsioneerib korrektselt. Manuaalsel aku testimisel on mitmeid olulisi puudusi.

Esiteks, testimisprotsess on ajamahukas. Aku funktsioneerimise kontrollimiseks tuleb läbi viia üle 15 testi. Iga testi korral peab inimene ühendama akuga vajalikud seadmed (laadija, elektriratas, signaaltakistid) ja seejärel need lahti võtma. Kuigi ühe seadme

ühendamine ei võta palju aega, muutub suure testide arvu tõttu testimisele kuluv aeg märkimisväärseks. Sama kehtib ka aku reaktsiooni jälgimise ja hindamise kohta.

Teiseks võib inimfaktor avaldada negatiivset mõju testimisprotsessile, kuna suure testide hulga manuaalne läbiviimine võib muutuda monotoonseks. Käsitsi tehtavate tegevuste ja aku reaktsiooni manuaalse jälgimise ning hindamise käigus võivad tekkida vead, mis võivad mõjutada testimistulemusi.

Kolmandaks, osade testide teostamine on keeruline. Praegu puudub seadmestik aku tühjendamiseks ning aku tühjendamine toimub elektrirattaga sõitmise teel. Aku tühjenemine sõitmise käigus võtab umbes 2 tundi, kui sõita täis koormatud elektrirattaga maksimaalse kiiruse juures.

Testimisprotsessi on võimalik parendada selle automatiseerimise teel. Automatiseerimine lihtsustaks testimist, vähendaks testimiseks kuluvat aega ning eemaldaks negatiivse inimfaktori mõju testimisele. Selleks tuleks kasutusele võtta spetsiaalne teststend, mis suudaks teostada ettevõtte poolt määratud testid automaatselt.

Turul saadaval olevad teststendid ei sobi ettevõtte aku testimiseks tema eriliste funktsioonide tõttu. Kuna need on mõeldud tüüpiliste BMS-ide testimiseks, puudub neil vajalik funktsionaalsus osade testide teostamiseks. Turul saadavad teststendid ei toeta CAN funktsionaalsust ega võimalda automaatselt jälgida BMS programmi sees olevaid väärtusi. Samuti pole neid võimalik programmeerida vastavalt ettevõtte poolt määratud testide vajadustele. Seega on vajalik välja töötada spetsiaalne stend, mille eesmärk on automatiseerida aku funktsionaalset testimist. Järgmises peatükis kirjeldatakse välja töötatud stendi lahendus ja selle elektriline disain.

3. TESTSTENDI LAHENDUS

Välja töötatava automaatse teststendi ülesandeks on teostada ettevõtte aku funktsionaalset testimist. Teststend peab suutma läbi viia kõik ettevõtte poolt määratud testid minimaalse inimese osalusega testimise protsessis – inimene peab ainult ühendama aku stendiga ja käivitama testimise protsessi nupu abil.

Stendi kasutamise töövoog on skemaatiliselt kujutatud Lisas 1. Kõigepealt peab stendi kasutaja ehk testija stendi ette valmistama: ühendama kõik stendi osad kokku, ühendama toite jne. Seejärel ühendab kasutaja stendiga testitava aku ja käivitab testimise protsessi. Pärast testimise käivitamist peab stend teostama kõik käivitatud testid järjest seni, kuni need on lõpetatud. Pärast teste peab teststend andma testide kokkuvõtte.

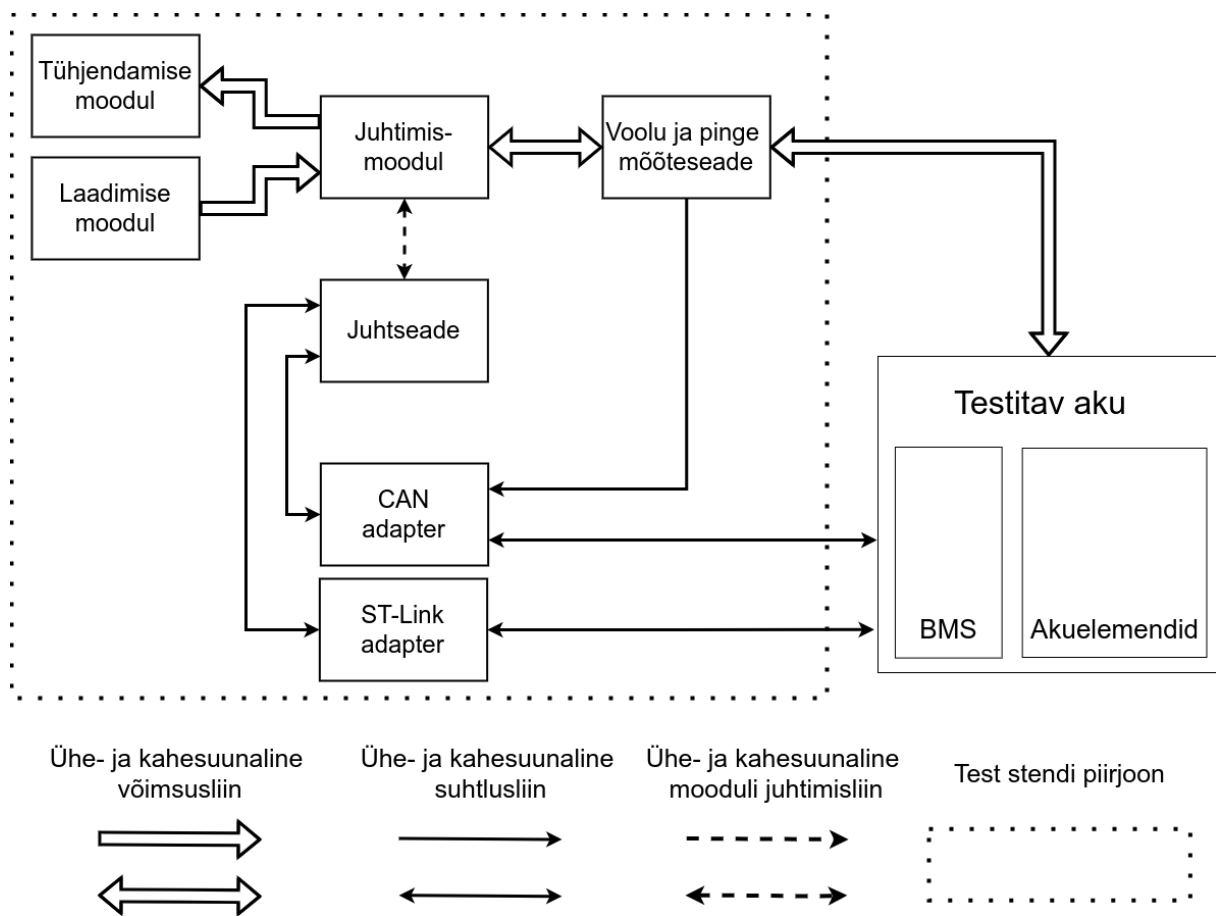
Testide teostamiseks, stend peab suutma täita kõik all loetletud ülesanded:

- imiteerida elektriratta elektrisüsteemi ja aku laadijat;
- teostada akuga kõik testides ettenähtud tegevused:
 - ◆ laadida BMS-ile tarkvara koodi üles nii muutmata, kui ka testimise eesmärkidel programmkoodi muudatud väärtustega;
 - ◆ saata akule CAN sõnumid BMS programmeerimiseks;
 - ◆ ühendada akule elektriratta ja laadija imitatsioone;
 - ◆ ühendada akule elektriratta ja laadija signaaltakistid;
 - ◆ koormata ja laadida akut pideva 10 A vooluga;
- jälgida aku reaktsiooni teostatud tegevustele:
 - ◆ lugeda BMS-i programmisisesed väärtused;
 - ◆ mõõta aku väljundi pinget ja aku voolu;
 - ◆ võtta BMS-ilt CAN sõnumid vastu;
- hinnata läbi viidud testide tulemused aku reaktsiooni järgi;
- anda kokkuvõtet läbi viidud testide tulemustest.

Teststend koosneb seitsmest osast: juhtseadmest, aku programmeerijast, CAN adapterist, pinget ja voolu mõõteseadmest, juhtimismoodulist, tühjendamise moodulist ja laadimise moodulist. Igal stendi osal on omad ülesanded ja nende ülesannete täitmiseks vajalik funktsionaalsus.

Joonisel 3 on näidatud teststendi moodustavad osad ja nende omavahelised seosed. Tühjendamise ja laadimise moodulid imiteerivad elektriratta elektrisüsteemi ja laadijat

ning võimaldavad koormata ja laadida akut. Need ühenduvad akuga läbi juhtimismooduli ja mõõteseadme. Juhtimismoodul võimaldab tühjendamise ja laadimise moodulite ühendamist akuga. Juhtseade juhhib kõike akuga tehtavaid tegevusi, jälgib aku reaktsiooni, hindab testide tulemusi ja teeb läbi viidud testidest kokkuvõtte. Juhtseade ise ei võimalda iseseisvat BMS programmisest väärtuste jälgimist, CAN suhtlemist ega voolu ja pinge mõõtmist. Nende funktsionaalsuste lisamiseks juhtseadmega on kasutatud abiseadmeid - ST-Link, CAN adapterit ja mõõteseadet (edaspidi IVT). Omavahel ühendatud ja koos toimivad stendi osad võimaldavad automaatselt läbi viia aku funktsionaalse kontrollimiseks ettevõtte poolt määratud testid.



Joonis 3. Teststendi moodulskeem

Lisas 2 on kujutatud stendi osade omavahelised elektrilised ühendused. Skeemil on juhtseadmest näidatud ainult stendiga ühenduses olevad GPIO (*General Purpose Input Output*) väljundid. ST-Link ja CAN adapter ei ole skeemil näidatud, kuna neil pole ühendust juhtseadme GPIO väljunditega – nemad ühenduvad juhtseadmega USB kaudu. Skeemi peal on näidatud pistik CAN adapteri juhtimismooduliga ühendamiseks, kuna CAN adapter ühendub akuga läbi IVT kaabli.

ühendus juhtimismooduliga. Juhtseadme ja juhtimismooduli koostoime on täpsemalt kirjeldatud peatükis 3.6.

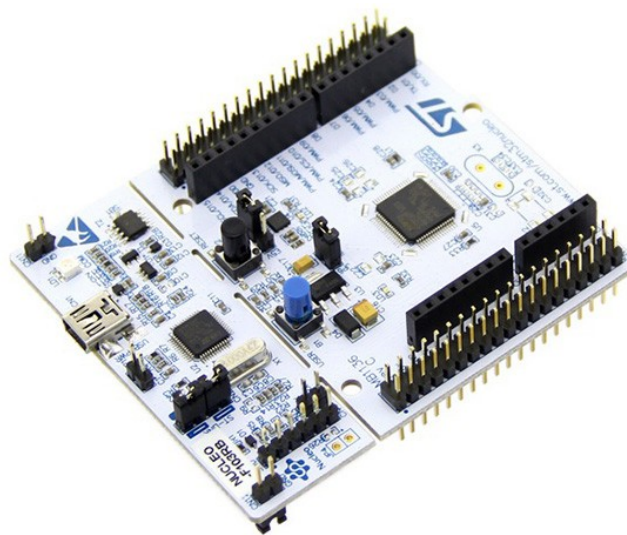
Mõned teststendi osad - kõik releed, ST-Link ja CAN adapter - saavad RP-ist 5 V toidet. On oluline tagada, et kogu 5 V tarbimine ei ületa RP maksimaalselt lubatud tarbimist. RP andmelehe kohaselt võimaldab 3 A toiteploki kasutamine 600 mA voolutarbimist tema 5 V toiteliinist. ST-Link tarbib 100 mA ja CAN adapter tarbib 90 mA. Mõlemate 20 A võimsusreleede tarbimine on 180 mA, kuid neid ei kasutata kunagi koos. Signaaltakistite releede tarbimine on 30 mA, ja need kõik võivad olla ühendatud. Seega on kogu maksimaalne võimalik 5 V tarbimine koos stendi osadega $100 + 90 + 180 + (4 \times 30) = 490$ mA. Sellest järeldub, et RP on piisavalt võimas stendi komponentide toitmiseks. Samuti on oluline arvestada, et maksimaalne RP GPIO väljundi vool on 16 mA [6].

ST-Link, CAN adapter ja IVT täiendavad juhtseadme funktsionaalsust, võimaldades sellel teostada kõiki testides ettenähtud tegevusi ja jälgida aku reaktsiooni. ST-Link võimaldab RP-l suhelda BMS-iga ja lugeda BMS programmisesesed väärtused, CAN adapter võimaldab andmevahetust CAN-võrgus ning IVT võimaldab mõõta pinget ja voolu ning edastada seda teabe RP-le. Koos moodustavad need seadmed tervikliku süsteemi, mis võimaldab juhtseadmel automaatselt juhtida testimise protsessi ja koguda ning analüüsida testide tulemusi.

3.2 ST-Link

ST-Link on STM mikrokontrolleritega kasutamiseks ettenähtud silurite ja programmeerijate sari.

ST-Link mängib olulist rolli juhtseadme funktsionaalsuse laiendamisel. Esiteks, ST-Link võimaldab juhtseadmel lugeda reaajas BMS programmi siseseid väärtusi, nagu vool, pinge ja aku olekud, mis võimaldab juhtseadmel jälgida ja hinnata aku reaktsiooni testimise ajal. Teiseks, see võimaldab juhtseadmele laadida BMS-ile tarkvarakoodi, mis on vajalik testimise protsessi kontrollimiseks ja juhtimiseks. See võimaldab juhtseadmel koguda olulist teavet aku käitumise kohta testimise käigus.



Joonis 5. NUCLEO-F103RB - ST-Link programmeerija [7]

Välja töödettava teststendi lahenduses kasutatakse NUCLEO-F103RB (Joonis 5) ST-Link seade. Arvutiga töötamiseks ST-Link vajab spetsiaalsed draiverid, mis on Linux operatsioonsüsteemile saadaval. ST-Link-i voolu tarbimine ei ületa 100 mA, seega see ei koorma juhtseadme 5V ahela oluliselt [7].

ST-Link ühendub juhtseadmega USB kaudu. USB kaudu toimub ST-Link-i toitmine ja juhtseadmega suhtlus. ST-Link-i teine programmeerimis kaabel ühendub otse BMS-i külge viiese lintkaabliga.

3.3 CAN adapter

CAN adapter on oluline teststendi osa, kuna see võimaldab juhtseadmel suhelda CAN protokolliga abil teiste CAN seadmetega, nagu näiteks BMS või IVT. Kuna RaspberryPi ise ei toeta CAN protokolliga, siis CAN adapter on vajalik, et anda juhtseadmele võimekus suhelda akuga CAN protokolliga kaudu. Sellel on kaks olulist ülesannet: esiteks, see võimaldab testida BMS-i CAN funktsionaalsust, tagades, et BMS suudab edastada akuga seotud teavet elektriratta elektroonikale; teiseks, kuna aku saab programmeerida CAN kaudu, on oluline tagada, et BMS-ile koodi üleslaadimine toimub korrektselt.

Valitud Kvazer Leaf Light v2 CAN adapter (Joonis 6) pakub vajalikku võimekust teststendile, võimaldades juhtseadmest suhelda CAN protokolliga abil teiste seadmetega, näiteks BMS-iga ja IVT-ga. Selleks, et CAN adapter saaks juhtseadmega suhelda, tuleb paigaldada vastavad draiverid juhtseadme Linux operatsioonsüsteemile.



Joonis 6. Kvazer Leaf Light v2 [8]

CAN Adapteri voolutarbimine on andmelehe järgi 90 mA, seega tema ei koorma juhtseadme 5V toiteliini liigselt [8].

CAN adapter ühendatakse juhtseadmega USB kaudu ning kuna seda ei saa otse akuga ühendada, tuleb selleks kasutada kaablit, mis ühendab adapteri juhtimismooduliga (Lisa 2). See võimaldab adapteril suhelda akuga läbi juhtimismooduli CAN liini.

3.4 IVT

IVT-100-U3-TOI-CAN2-12 (Joonis 7) on täpne pinge ja voolu mõõteseade, mille ülesandeks on võimaldada juhtseadmel täpseid mõõtmisi aku väljundi pingest ja voolust, sõltumata BMS-i mõõtmistest. Kuigi BMS teostab ka aku pingete ja voolu mõõtmisi, võib IVT pakkuda suuremat täpsust. [9]

Eriti täpne voolu mõõtmine on oluline laadimise ja tühjendamise protsesside ajal, kuna see võimaldab mõõta aku täpset mahutavust. IVT-ga mõõdetud koguenergiat võrreldakse seejärel BMS-i poolt mõõdetud koguenergiaga. Seda võrdlust tehakse selleks, et kontrollida, kas BMS-i sisemine mahutavuse ja SoC hindamise funktsionaalsus toimib korrektselt ja täpselt. Kui IVT-i mõõdetud koguenergia ja BMS-i mõõdetud koguenergia on omavahel sarnased või identseid, võib see viidata sellele, et BMS-i sisemine arvutusvõime töötab korrektselt ja annab täpseid tulemusi aku mahutavuse hindamisel.



Joonis 7. IVT-100-U3-TOI-CAN2-12 - voolu
ja pinge mõõteseade [9]

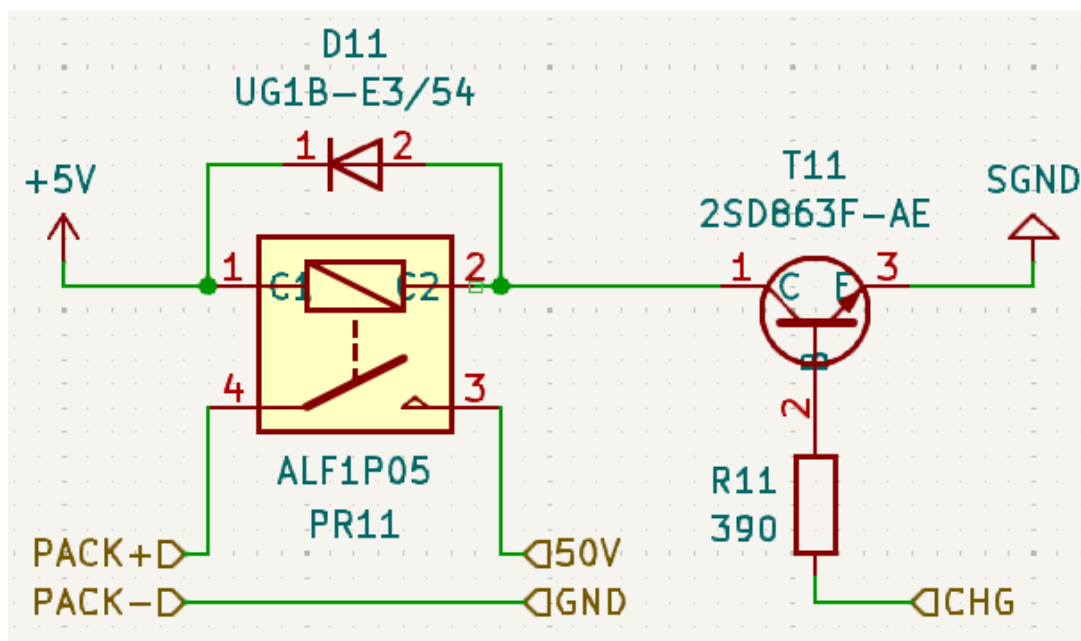
IVT on ühendatud aku ja teststendi vahele jadamisi, võimaldades tal lugeda aku voolu ja pinget. Selleks, et tagada teststendi töötamine ilma IVT-seadmeta, on IVT ühendused tehtud nii, et stendi saab kasutada ka siis, kui IVT-seadet pole paigaldatud. See võimaldab näiteks tootmise etapis testimist, kus aku täis laadimise ja tühjendamise teste ei teostata.

IVT-ga mõõdetud pinge ja vool edastatakse juhtseadmesse CAN-i kasutades. See võimaldab juhtseadmel saada reaalajas teavet aku voolu ja pingetaseme kohta ning seda teavet kasutada testide läbiviimiseks ja tulemuste analüüsimiseks.

3.5 Juhtimismoodul

Juhtimismoodul on teststendi keskne osa, millega on ühendatud juhtseade, CAN adapter, laadimismoodul, tühjenemismoodul ja testitav aku, mis on ühendatud juhtimismooduliga läbi IVT. Juhtimismoodulil on kaks peamist ülesannet. Esiteks, see ühendab akuga signaaltakistid, tühjendamise ja laadimise moodulid releede abil. Teiseks, see toimib teststendi oleku indikaatorina ja juhtpaneelina. Juhtimismooduli terviklik elektriskeem on esitatud Lisas 4.

Laadimismooduli ühendamiseks akuga on valitud ALF1P05 võimsusrelee. Relee kontaktori nominaalvool on 20 A, mis võimaldab varuga 10 A voolu kommuteerimist. Relee mähise juhtimispinge on 5 V ja mähise tarbitav vool on 180 mA, mis võimaldab relee mähist toita juhtseadme GPIO abil [10].



Joonis 8. Juhtimismooduli võimsusrelee akuga laadimistoide ühendamiseks

Laadimismooduli relee PR11 kontaktor ühendab laadimismooduli toite 50V kontaktiga aku väljundi kontaktiga PACK+ (Joonis 8). Relee mähisega on rööbiti ühendatud UG1B E3/54 diodiga D11, mis on ette nähtud juhtseadme 5 V toiteahela kaitsmiseks relee mähisega tekitatud vastupingest [11].

ALF1P05 relee lülitamiseks kasutatakse RP GPIO juhtimissignaali CHG ja NPN tüüpi 2SD863F-AE transistorit T11, mille nominaalne kollektori vool on 1 A ja minimaalne võimendustegur on 30. Juhtseade viib CHG 3.3 V pingele, mis põhjustab transistori kollektori ja emitteri vahel voolu liikumist, lülitades relee sisse. Relee väljalülitamiseks viib juhtseade CHG GPIO signaali 0 V pingele [12].

Transistori baasi vajaliku takistuse R_{B1} arvutamiseks tuleb kõigepealt leida vajalik transistori baasi vool I_B , A [13]

$$I_B = I_{LOAD} / h_{FE}, \quad (1)$$

kus I_{LOAD} – transistori kollektori ehk relee mähise vool, A;

h_{FE} – transistori võimendustegur.

Relee vajalik mähise vool I_{LOAD} võrdub 180mA. Valitud transistori võimendusteguriks h_{FE} on võetud 30, arvestades võimendusteguri halvemat varianti. Transistori vajalik baasi vool on $0.18 \text{ A} / 30 = 0.006 \text{ A}$. 0.006 A vool on RP GPIO jaoks ohutu, kuna RP GPIO maksimaalne vool on 0.016 A. Seejärel on võimalik leida transistori vajaliku baasi takistuse R_B , Ω [13]

$$R_B = (V_B - V_{BE}) / I_B, \quad (2)$$

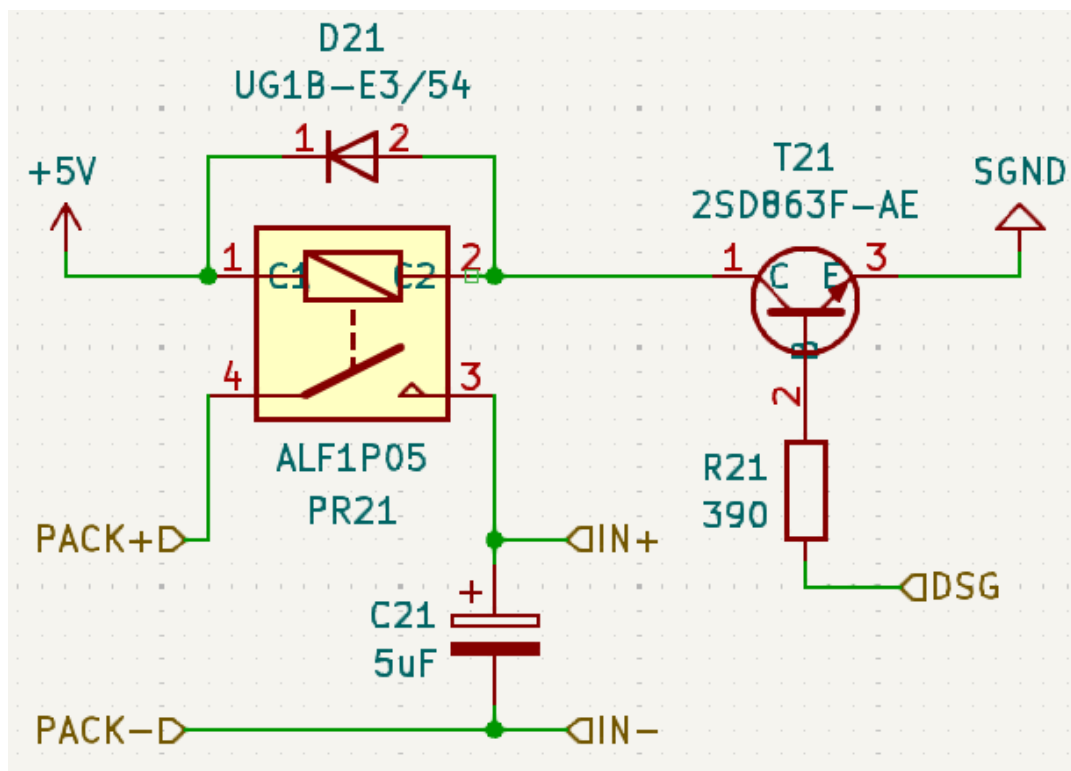
kus V_B – transistori baasil pinge ehk juhtseadme juhtimissignaali pinge, V;

V_{BE} – pingelang transistori baasi ja emitteri vahel, V.

Transistori V_{BE} on 1 V [12]. RP GPIO väljund vool on 3.3 V. [6] Arvutades vajaliku takistuse üleval kirjeldatud valemite järgi, $(3.3 - 1) / 0.006 \text{ A} = 383 \Omega$ on vajalik transistori baasi takistus. Takistite E12 standardreast kõige lähim takistuse väärtus on 390 Ω , seega valitakse see.

Tühjendamismooduli akuga ühendamiseks PR21 releeks on samuti kasutatud ALF1P05 võimsusrelee ning relee juhtimine on analoogne laadimismooduli ühendamisele ja kasutatakse samu komponente (Joonis 9).

Laadimise mooduli PR21 võimsusrelee kontaktor ühendab tühjendamise mooduli elektriratta koormsue imitatsiooni kontakti IN+ aku väljundi kontaktiga PACK+. Relee mähisega on rööbiti ühendatud UG1B-E3/54 diod D21. Relee PR21 lülitus on juhitud juhtseadme GPIO abil, DSG juhtimissignaali kaudu.

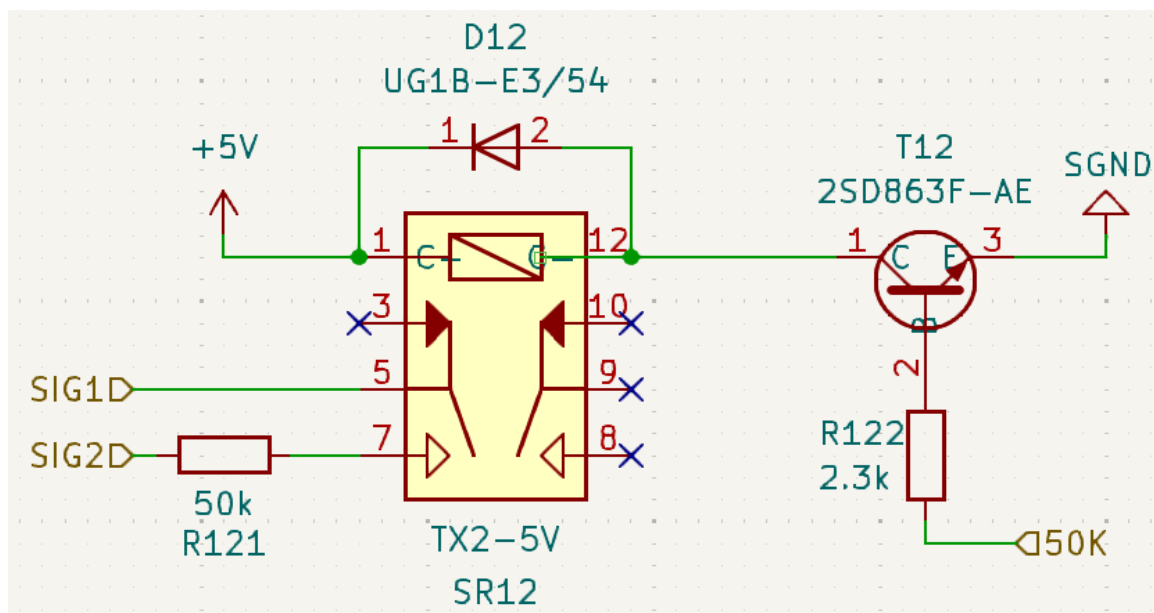


Joonis 9. Juhtimismooduli võimsusrelee akuga koormuse ühendamiseks

Tühjendamismooduli ja laadimismooduli releeühendusskeemide erinevus seisneb selles, et tühjendamismooduli IN+ ja IN- kontaktide vahele on lisatud 5 μ F kondensaator C21. See kondensaator imiteerib elektriratta elektrisüsteemi mahutavust ja võimaldab testida aku eellaadimise funktsiooni.

Aku tuvastab oma ühendamise elektrirattaga või laadijaga signaaltakisti abil, mis ühendub aku SIG1 ja SIG2 kontaktide vahele (Lisa 2). Aku tuvastab kolm signaaltakistit: 50, 170 ja 320 k Ω . Juhtimismoodulis on kolm samasugust releed, mille igaüks on mõeldud ühendamiseks ühe signaaltakistiga. Relee juhtimiseskeemid ja valitud seadmed on samad (Lisa 4).

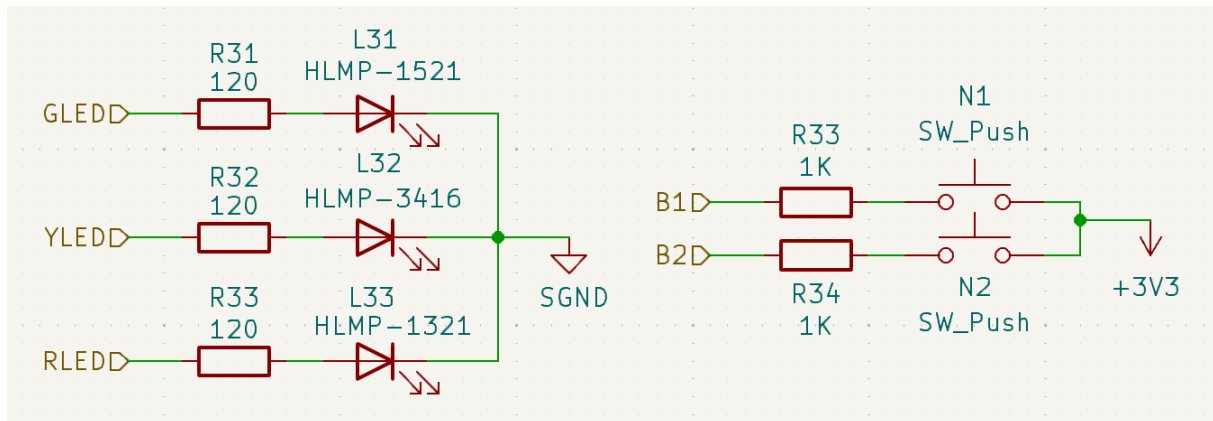
Akuga signaaltakistite ühendamiseks on valitud TX2-5V signaalrelee. Valitud relee puhul on oluline minimaalne relee koormus, kuna aku signaaltakistuse kontaktide vahel on 3.3 V pinge ja takisti ühendamisel tekib liiga väike vool, mis mõnede releede puhul ei võimalda koormuse õiget juhtimist. Seega on relee valitud, arvestades väikest relee kontaktori koormust. Valitud relee minimaalne koormus on 10 mA ja 10 mV [14], mis sobib selle relee väljatöötatavas lahenduses kasutamiseks. Relee mähise juhtimispinge on 5V ja mähisega tarbitav vool on 28 mA. Relee kontaktor ühendab takisti aku SIG1 ja SIG2 kontaktide vahele. Relee mähisega on samuti rööbiti ühendatud UG1B-E3/54 diood RP 5V ahela kaitsmiseks. Joonisel 10 on kujutatud laadimise signaaltakisti ühendamiseks relee.



Joonis 10. Juhtimismooduli relee laadimise signaaltakisti akuga ühendamiseks

Signaaltakistite signaalreleede lülitamiseks on kasutataud sama 2SD863F-AE transistor ja RP GPIO juhtimissignaali. Arvutades vajaliku transistori T12 baasi voolu ja baasi takistuse R122 valemite (1) ja (2) vastavalt, leitakse, et vajalik transistori baasi vool I_B on $0.030 / 30 = 0.001$ A ja vajalik transistori baasi takistus on $(3.3 - 1) / 0.001 = 2300 \Omega$.

Juhtimismooduli indikatsiooni ja juhtimisnupude osa koosneb kolmest LED indikaatorist ja kahest nupust (Joonis 11). Nupud on vajalikud stendi kasutamise lihtsustamiseks – nupude abil saab stendi kasutaja käivitada eelprogrammeeritud teste või peatada jooksvaid teste. Indikaatorid on vajalikud selleks, et testimise ajal oleks arusaadav, millises olekus on stand – kas testimise protsessis on aktiivne, kas on tekkinud vead testide läbi viimisel, kas testide teostamine on lõppenud.



Joonis 11. Juhtimismooduli indikatsiooni ja nupude seksioon

Indikatsiooni LED-ideks valiti HLMP-1521, HLMP-3416 ja HLMP-1321. Kõike kolme LED-i pingelang on 2V ja nominaalvool 12 mA [14][15][16], mis võimaldab lülitada neid otse RP GPIO-st. LED-idega tarbitava voolu tuleb piirata kasutades sobiva eeltakisti. Valemi (3) abil on võimalik leida LED-ile vajalik eeltakistuse väärtus R_L , Ω [17]

$$R_L = (U_P - U_L) / I_L \quad (3)$$

kus U_P – LED-i toitepinge ehk juhtseade GPIO 3.3 V väljund, V;

U_L – LED-i pingelang, V ;

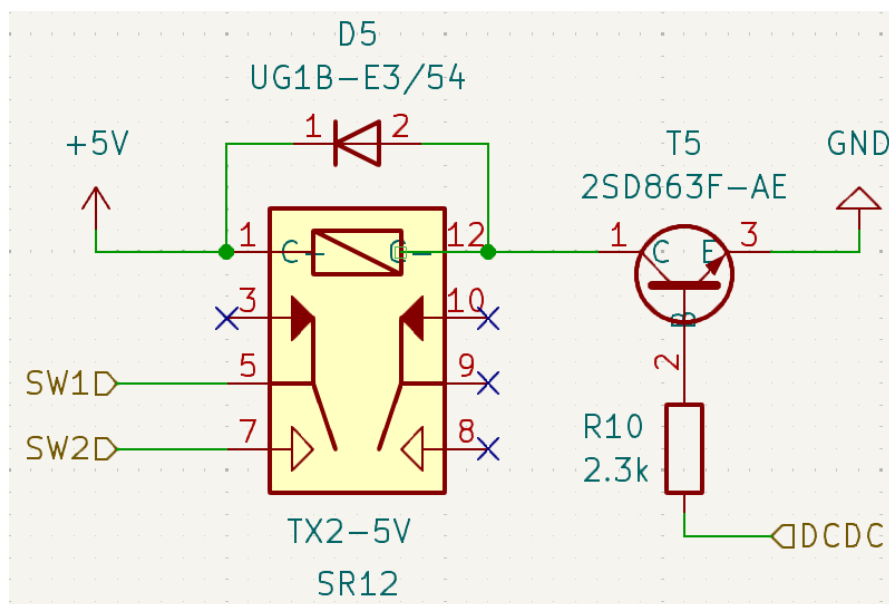
I_L – LED-i nominaalvool, A.

LED-i vajalik eeltakistuse väärtus on 108 Ω . Lähim sobiv nimiväärtusega takisti on 120 Ω , mis võimaldab LED-ide toitmist 10.8 mA vooluga.

Testimise käivitamiseks nupud on samuti ühendatud RP GPIOga. Mõlema nupude üks kontakt on ühendatud RP 3.3 V toidega. Teine nupude kontakt on ühendatud RP GPIO-ga B1 ja B2 vastavalt läbi 1 k Ω takisti, et vältida GPIO lühistamist. Nupude N1 ja N2 (Joonis 11) vajutamisel tuvastab juhtseade GPIO sisendites B1 ja B2 (Joonis 11) pinge tõusu ja tõlgendab seda kui nupu vajutust.

Nuputüüp valitakse stendi ehitamise etapis, kuna nupu valimisel tuleb arvestada juhtimismooduli korpuse disainiga, mis siin lõputöös ei ole käsitletud.

Lisaks seadmete ühendamiseks releedele, indikaatoritele ja nuppudele, juhtimismoodulis asub ka tühjendamise mooduli pingeregulaator lüliti, mis on lülitav SR12 rele abil. SR12 on sama rele mis on kasutatud akuga signaaltakistite ühendamiseks. Erinevus takistid ühendavate releskeemidega seisneb selles, et antud rele lülitab kaks kontakti otse kokku (Joonis 12) ja toimib nagu tavaline mehaaniline lüliti ja töötab tühjendamise mooduli koormusvoolu pingeregulaatori lülitina.



Joonis 12. DCDC sisse lülitav rele

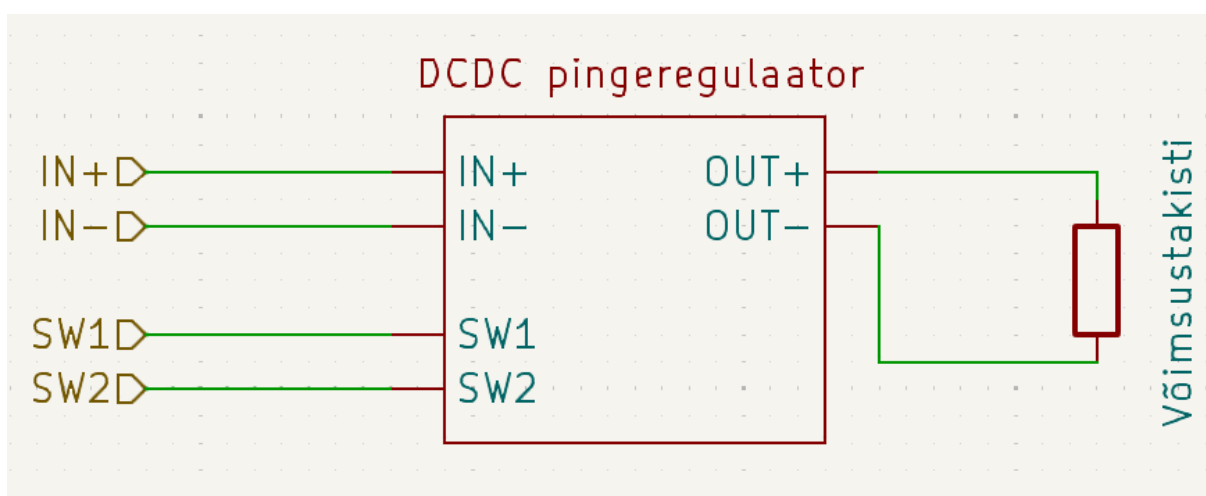
Tühjendamise mooduli koormusvoolu reguleerimise mehhanism ja SR12 rele ülesanne on kirjeldatud järgmises peatükis 3.6.

Juhtseadme mooduli väljatöötamisel arvestatakse, et seda hakatakse ehitama perforeeritud trükkplaadist, mis võimaldab juhtimismooduli kiiremat prototüüpimist. Seega on juhtimismooduli lahenduse jaoks valitud komponendid DIP (Dual in-line Package) korpustes, mida on võimalik joota perforeeritud trükkplaadi külge.

Lisaks sellele, enne stendi ehitamist on vajalik välja töötada juhtimismooduli jaoks korpus, arvestades kõikide komponentide paigutust, sealhulgas nupude ja LED-ide asukohta.

3.6 Tühjendamise moodul

Tühjendamise mooduli ülesandeks on imiteerida elektriratta elektrisüsteemi ja töötada koormusena testitava aku tühjaks laadimiseks. Moodul võimaldab teostada akuga teste, mis kontrollivad aku tühjaks laadimist ja sellega seotud funktsionaalsust. Ettevõtte poolt määratud testides on ette nähtud aku tühjendamine 10 A vooluga. Tühjendamise moodul peab tagama 10 A voolu kõigi võimalike aku pingete juures ning võimaldama pidevat tühjaks laadimist.

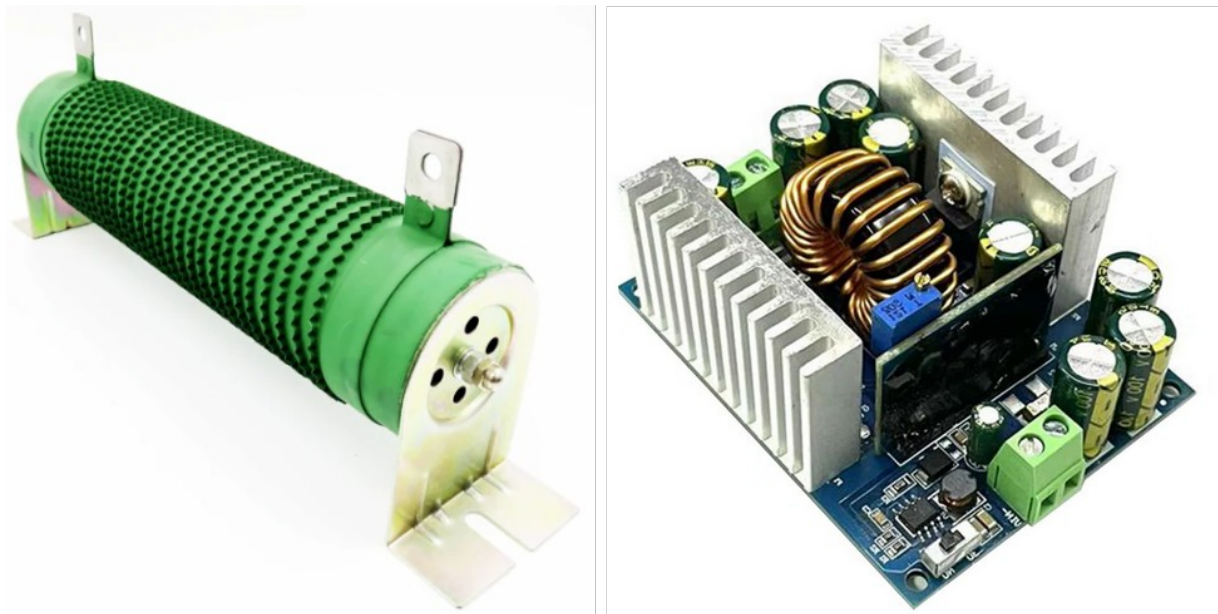


Joonis 13. Tühjendamise mooduli elektriskeem

Joonisel 13 on kujutatud tühjendamise mooduli elektriskeem ja ühendused juhtimismooduliga. Pingeregulaatori IN+ ja IN- on ühendatud testitava aku PACK+ ja PACK- kontaktidega läbi juhtimismooduli (Lisa 2 ja 3). Koormuse ühendamine ja lahti võtmine toimub juhtimismoodulis oleva PR21 relee kaudu, nagu eelmises peatükis kirjeldatud. SW1 ja SW2 on ühendused, mille kaudu toimub pingeregulaatori sisse- ja väljalülitamine, mis on teostatud SR22 releega ja SW GPIO juhtimissignaali kaudu (Joonis 12).

Aku koormust moodustavad pingeregulaator ja võimsustakisti (Joonis 14). Teststendi tühjendamise mooduli jaoks kasutatakse võimsustakistit, mis toimib aku koormusena. Võimsustakisti tarbib akust energiat ja muundab selle soojuseks. Võimsustakisti kasutamisel tuleb arvestada mitme olulise aspektiga. Esimene aspekt seisneb selles, et aku pinge langeb tühjenemisel. Kui aku tühjendamiseks kasutatakse fikseeritud takistust,

siis koormusvool väheneb koos aku pingelangusega. Pideva koormusvoolu tagamiseks on vaja valida sobiv takistus ning võimaldada aku koormusvoolu reguleerimist sõltuvalt aku pingest. Teine aspekt seisneb selles, et võimsustakisti hajutab kogu tarbitud elektrienergia soojuseks ning soojeneb intensiivselt. Seega on oluline valida sobiv takisti, arvestades võimsustakisti võimsust ning vajadusel tagada selle töötemperatuuri piirides töötamine, valides sobiva jahutusmeetodi. Võimsustakisti näitlik kujutis on näidatud Joonisel 14, vasakul.



Joonis 14. Võimsustakisti ja PWM pingemuundur: vasakul - võimsustakisti näitlik pilt [19], paremal - valitud PWM pingeregulaator [20]

Kõigepealt valitakse sobiva takistuse suurus ja võimsusklass. Kuna takisti peab võimaldama aku tühjendamist 10 A vooluga ka minimaalse aku pingel juures, tuleb takisti väärtus valida lähtuvalt aku minimaalsest pingest. Testidega on ette nähtud, et aku ei lange alla 36 V ning vajalik tühjendusvool on 10 A, seega sobiva takistuse suurus on $36 \text{ V} / 10 \text{ A} = 3.6 \text{ } \Omega$. Kõige lähem saadav väärtus võimsustakistina on 3.3 Ω . Minimaalse aku pingega on aku vool $36 \text{ V} / 3.3 \text{ } \Omega = 10.9 \text{ A}$. Voolu 0.9 A erinevus pole märkimisväärne, seega kasutatakse 3.3 Ω võimsustakistit.

Takisti vajalike võimsusklassi valimiseks tuleb veenduda, et aku tühjendamisel 10 A juures võimsustakisti ei kuumeneks üle. Takistiga hajutava võimsuse on võimalik arvutada valemi järgi:

$$P_T = I_T^2 \times R_T \quad (4)$$

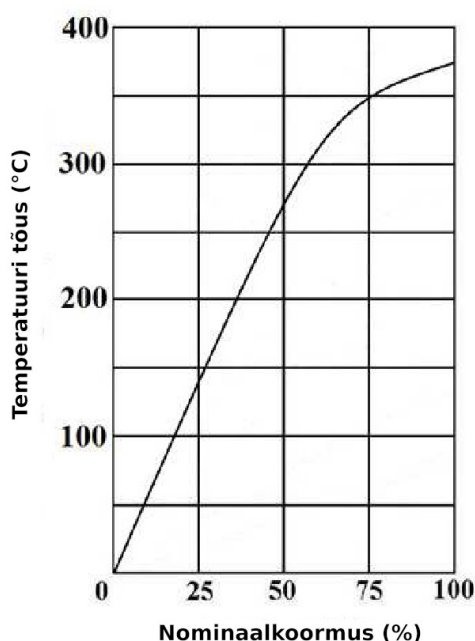
kus P_T – võimsustakistiga eraldav soojusvõimsus, W;

I_T – võimsustakistiga tarbitav vool, A;

R_T – võimsustakisti takistuse väärtus, Ω .

Testidega ettenähtud vooluga tühjenemisel eraldub võimsustakistis 330 W soojusvõimsust. Valides 2500 W nominaalvõimsusega takisti, moodustab 330 W 13.2% takisti nominaalvõimsusest. Takisti andmelehe kohaselt (Joonis 15) [21], töötab 13.2% nominaalvõimsusest režiimis, ei tõuse takisti temperatuur üle 75 °C. Arvestades, et võimsustakisti ümbritsev temperatuur on 20 °C, ei ületa võimsustakisti lõpp-temperatuur 90 °C. Andmelehe kohaselt on maksimaalne lubatud võimsustakisti temperatuur 155 °C. Pideva 10 A vooluga aku tühjendamisel jääb võimsustakisti temperatuur lubatud vahemikku. Seega valiti tühjendamise mooduli jaoks 3.3 Ω 2500 W võimsustakisti TE2500B3R3J firmalt TE Connectivity. [21]

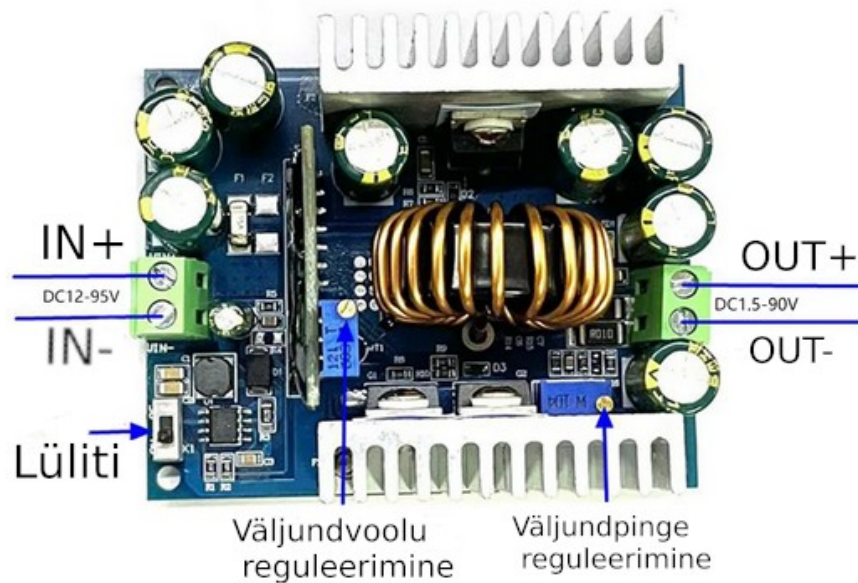
Temperatuuri Tõusu Diagramm



Joonis 15. TE2500B3R3J võimsustakisti temperatuuri tõusu diagramm [21]

Täislaetud aku pinge on 48 V. Täislaetud aku läbimisel 3.3 Ω takistiga oleks aku vool 48 V / 3.3 Ω = 14.54 A. Kuna see vool ületab testides määratud aku tühjenemise voolu, tuleb luua võimalus reguleerida koormusvoolu täislaetud aku tühjendamisel.

Kõige lihtsam viis aku voolu piiramiseks on kasutada valmis alalispingemuundurit, mida nimetatakse ka DC-DC konverteriks. See ühendatakse võimsustakisti ja juhtimismooduli vahele ning see paikneb eraldi korpuses võimsustakisti juures. Joonisel 16 on näidatud DC-DC konverter, mille kontakt IN- ühendub aku PACK- kontaktiga ja IN+ ühendub PACK+ kontaktiga läbi rele PR21 (Joonis 9). DC-DC konverteri OUT+ ja OUT- ühenduvad võimsustakisti mõlemaga otsaga, et võimsustakisti tarbib DC-DC väljundist reguleeritud voolu (Joonis 16).



Joonis 16. Valitud DC-DC pingemuundur ja tema ühendused [19]

Pinget alandava DC-DC konverterina valiti selline pingeregulaator, mis on kujutatud Joonisel 14 ja 16. Antud DC-DC konverteri peamine funktsioon on tagada pidev väljundvool sõltumata sisendpingest. [20] Valitud DC-DC konverteri tehnilised parameetrid vastavad vajadustele: nominaalne võimsus on 400 W, lubatud sisendpinge kuni 95 V ja nominaalvool 15 A, seega see sobib hästi kasutamiseks teststendis. [20]

Enne DC-DC konverteri kasutamist testimisel tuleb reguleerida selle väljundvool 10 A peale ja väljundpinge 36 V peale, kasutades selleks potentsiomeetreid, nagu näidatud Joonisel 16 (väljundvoolu ja väljundpinge reguleerimine). Samuti tuleb asendada DC-DC konverteri sisseehitatud nupp (Joonisel 16) ja ühendada selle asemele SR12 rele, et võimaldada aku tühjendamist juhtida läbi võimsustakisti juhtseadme. SR12 rele juhitakse juhtseadme SW juhtimissignaali abil ning seda on kirjeldatud peatükis 3.5 ja kujutatud Joonisel 12.

3.7 Laadimise moodul

Laadimismooduli ülesandeks on laadida testitavat akut. See moodul peab võimaldama teostada aku teste, mis on seotud aku täislaadimisega.

Liitiumioonakude laadimine toimub tavaliselt CC/CV režiimis - konstantse voolu ja konstantse pinge režiimides. See tähendab, et kui alguses on laadija ja aku vahel suur pingevahe, tagab laadija, et laadimine toimuks maksimaalse lubatud vooluga. Ettevõtte testides määratud laadimisvool on 10 A. Ettevõtte aku laadimiseks kasutatakse laadijat, mille väljundis on 50 V.

Väljatöötatava stendi jaoks valiti MeanWell HLG-480H-48A toiteplokk. See toiteplokk võimaldab töötada nii CV (konstantse pinge) kui ka CC (konstantse voolu) režiimides. CC režiimis suudab see tagada aku laadimist 10 A vooluga. [22]



Joonis 17. HLG-480H-48A toiteplokk [22]

Toiteploki sisend ühendub 230 V võrku. Toiteploki väljund ühendub teststendi juhtimismoodulisse ning on akuga ühendatav PR11 relee abil ja juhitud juhtseadme CHG juhtimissignaali abil.

4. TESTSTENDIGA AUTOMAATNE TESTIDE LÄBIVIIMINE

Kolmanda peatüki kirjeldatud teststendi riistvaraline lahendus oleks teoreetiliselt võimeline teostama kõiki ettevõtte poolt määratud teste. Iga vajalik eraldi ülesanne, mis on loetletud kolmanda peatüki alguses, on olemasoleva riistvaraga teostatav. Selle lahenduse abil saab testida aku tühjenemist ja laadimist, tagades samal ajal vajalikud pingerežiimid ja voolud vastavalt ettevõtte spetsifikatsioonidele.

Neljandas peatükis kirjeldatakse, kuidas ettevõtte poolt määratud kahe testi põhjal välja töötatud teststendi riistvaraline lahendus viib testimise protsessi läbi. Stendiga testimise läbiviimise kirjeldus aitab veenduda, et välja töötatud lahendus on võimeline teostama ettevõtte poolt määratud testid. Kirjelduse eesmärk on näidata, kuidas stendi riistvaraline funktsionaalsus võimaldab teha vajalikke tegevusi akuga ja kontrollida aku reaktsiooni. Testimise protsessi kirjeldamisel eeldatakse, et teststendi juhtseade on eelnevalt programmeeritud, teststend on kokku pandud, kõik seadmed on testitud ja seadistatud ning aku on stendiga ühendatud. Kirjeldus tugineb testimise protsessi diagrammile, mis asub Lisas 5, kus on täpsemalt kirjeldatud juhtseadme täpsemad tegevused.

Kõigepealt paneb stendi juhtseade kõik LED-id põlema, indikeerimiseks, et stend on aktiveeritud ja ootab käsku aku tuvastamiseks. Aku tuvastamiseks stendiga peab kasutaja vajutama nuppu N2. Juhtseade reageerib nupuvajutusele ja üritab ST-Linki kaudu lugeda BMS-i oleku programmi sisesed väärtused. Kui aku olek on edukalt tuvastatud, lülitab juhtseade välja kollase LED-indikaatori ja süütab roheline LED-indikaatori, indikeerides, et stend on testimiseks valmis. Testimise alustamiseks peab kasutaja vajutama nuppu N1. Kui nupuvajutus on tuvastatud, alustab stend testimiseks ettevalmistuse.

Ettevalmistamise etapi eesmärk on veenduda, et aku on algselt välja lülitatud olekus. Juhtseade süütab kollase LED-i, indikeerides, et stend on alustanud testimise protsessi. Roheline ja kollane LED koos näitavad, et stend on käivitatud. Juhtseade loeb BMS-i oleku väärtuse ST-Linki kaudu ja kontrollib, et oleku väärtus vastab väljalülitatud olekule. Seejärel kontrollib juhtseade, et aku väljundi pinge on 0 V, kasutades IVT-ga mõõdetud aku väljundi pinge lugemist. Kui aku väljundi pinge ei ole 0 V või tuvastatud aku olek ei vasta väljalülitatud olekule, siis programm lõpetab testimise protsessi. Testimise protsessi lõpetamise protseduurid on kirjeldatud hiljem. Kui aku on väljalülitatud olekus

ja tema väljundi pinge on 0 V, jätkab stand aku testimist ja alustab esimese testi läbiviimist.

Esimese testi eesmärk on kontrollida, kas aku tuvastab elektriratta ühendamisel korrektselt elektriratta, ning kas see läheb eellaadimise ja tühjenemise olekutesse korrektselt, ning kas BMS eellaeb elektriratta mahtuvuslikud komponendid. Juhtseade ühendab elektriratta koormuse imitatsiooni ja tühjenemise signaaltakisti akuga, viies DSG ja 170K GPIO signaalid kõrgele ning lülitades kinni releed D21 ja D23. Seejärel kontrollib juhtseade, kas aku on jõudnud eellaadimisolekusse, lugedes BMS-i oleku väärtuse ST-Linki kaudu ja veendumaks, et see vastab eellaadimise oleku väärtusele. Seejärel kontrollib juhtseade, kas aku väljundi pinge on tõusnud cell pack-i pingeni, lugedes vastava BMS-i mõõdetud PACK+ ja BAT+ pinged - aku väljundi ja cell pack-i pinged vastavalt. Kui elektriratta koormuse imitatsioon on laetud, veendub juhtseade, et aku on saanud tühjenemise olekusse, lugedes vastava BMS-i väärtuse. Kui aku ei õnnestunud läbida kirjeldatud etappe edukalt, järelgab juhtseade, et aku reaktsioon teostatud tegevustele on vale, ja alustab testimise lõpetamise protseduuri. Kui aku on kõik etapid edukalt läbinud, järelgab juhtseade, et aku reaktsioon on korrektne, ja alustab teise testi läbiviimist.

Teise testi eesmärk on kontrollida, kas BMS rakendab alapingest kaitset aku tühjenemisel ja kas seejärel läheb õigesse veaolekusse. BMS-i ülesandeks on tuvastada cell pack-i rööpahelate pinge langemist ja kaitsta akuelemente alapingest piirades akust voolu tarbimist ning indikeerida aku veaolekut korrektselt. Praegu on aku PACK+ ja PACK- väljundi kontaktid ühendatud elektriratta koormuse imitatsiooni kontaktidega IN+ ja IN- releed D21 kaudu. Juhtseade lülitab DCDC lülitava releed D22 ja alustab aku tühjenemist läbi võimsustakisti 10 A vooluga. Seejärel on juhtseadmel kaks ülesannet. Esiteks, juhtseade peab jälgima akust tarbitavat voolu IVT abil ja cell pack-i rööpahelate pingeid ST-Link-i abil, lugedes BMS-i vastavaid programmi siseseid väärtusi. Teiseks, juhtseade peab tuvastama, kui vähemalt ühe rööpahela pinge langeb minimaalse lubatud pingeni, ja veenduma, et BMS piirab täielikult akust voolu tarbimist. Juhtseade jälgib pidevalt rööpahelate pingeid ja aku voolu. Kui IVT-ga mõõdetav vool on 10 A ja ST-Link-i kaudu loetavad rööpahelate pingeväärtused on minimaalsest lubatust pingest kõrgemad, järelgab juhtseade, et testimine toimub ilma probleemideta, ja stand jätkab aku tühjenemist.

Teisel ja antud juhul viimasel testil on kolm võimalikku tulemust. Esimene võimalik tulemus on, et aku testimise protsess lõpeb edukalt. Kui juhtseade tuvastab, et aku vool on 0 A, vähemalt ühe rööpahela pinge on langenud alla minimaalse lubatud taseme ja

BMS on andnud veakoodi "alapinge", siis juhtseade järeldab, et aku reaktsioon on õige ning teine test on edukalt läbitud. Sel juhul lülitab juhtseade välja rohelise ja kollase LED-i, näidates, et testimise protsess on lõppenud, seejärel lülitab välja DCDC, lahti ühendades relee D22, ja ühendab lahti koormuse imitatsioonist aku, avades relee D21. Testimise käigus salvestab juhtseade teavet läbi viidud testide, tehtud tegevuste ja nende tulemuste kohta. Kui aku on lahti ühendatud ja test on lõpule jõudnud, salvestab juhtseade testimise tulemused, mida kasutaja saab hiljem vaadata.

Teine võimalik testi tulemus on testimise lõpetamine aku ebasobiva reaktsiooni tõttu. Kui juhtseade tuvastab, et aku vool on 10 A, kuid rööpahelate pinged on langenud alla minimaalse lubatud taseme ning BMS ei piiranud aku tühjenemist, järeldab juhtseade, et aku reaktsioon on ebasobiv ja alustab testimise lõpetamise protseduuri. Lõpetamise protseduuri käigus lülitab juhtseade kõigepealt pingemuunduri välja aku tühjenemise peatamiseks. Seejärel ühendab juhtseade aku koormusest lahti, avades relee D21 ja seejärel ka signaaltakisti. Lisaks lülitab juhtseade välja rohelise LED-i. Ainult kollase LED-i põlemine tähendab, et testimine on lõpetatud aku ebasobiva reaktsiooni tõttu. Kokkuvõtte testimise tulemustest salvestatakse, kust on võimalik näha, millise testi ja millise tegevuse juures testimine lõpetati ning mis oli selle põhjuseks olnud reaktsioon ja selle väärtus. Sama testitulemus saavutatakse, kui juhtseade tuvastab BMS-ilt alapingest kaitse rakendamise, kuid seejärel BMS ei anna veakoodi, mis võib juhtuda näiteks tarkvaravea tõttu.

Kolmandaks võimalikuks testi tulemuseks on testimise viga, mis võib olla tingitud vigadest, mida oli raske ette näha testimise planeerimisel. Näiteks, kui IVT-ga mõõdetud vool on 10 A, kuid see ei ole 0 A. Seda võib põhjustada stendi sisemine tõrge, millest juhtseade annaks märku. Sama kehtib ka olukorra kohta, kus laadimine on lõppenud, kuid rööpahelate pinged on normipiirides.

Tühjendamisega seotud testide kirjeldusest võib järeldada, et välja töötatud stand suudaks täita kolmandas peatükis püstitatud ülesandeid ning teostada ettevõtte poolt määratud testid automaatses režiimis.

KOKKUVÕTE

Kokkuvõtteks võib öelda, et käesolev töö keskendus teststendi väljatöötamisele, mis võimaldaks testida elektriratta akusid vastavalt ettevõtte poolt määratud testidele ja testimise protseduurile. Töös käsitleti testimise protsessi, riistvara komponentide valikut, arvutusi ja ühendusi, samuti testimise läbiviimiseks vajalikke protseduure ja tulemusi.

Teststendi riistvaraline lahendus koosnes mitmest moodulist, sealhulgas juhtimis-, tühjendamis- ja laadimismoodulitest. Iga moodul oli kavandatud ja konstrueeritud vastavalt selle funktsioonile, võimaldades aku testimist vastavalt ettevõtte nõuetele. Samuti lahendus sisaldas juhtseadme, CAN adapteri ja ST-Link programmeerija valimist ja rakendamist stendi disainis rakendamist.

Testimise protsess koosnes mitmest etapist, alustades aku tuvastamisest ja lõpetades tühjendustestiga. Iga etapi eesmärk oli veenduda, et aku reageerib õigesti erinevatele testolukordadele vastavalt ettevõtte poolt kehtestatud kriteeriumidele.

Diplomitöö tulemusena on välja töötatud teststendi elektriline osa koos valitud komponentide ja nende ühendustega. Edaspidi on vajalik juhtmestiku valik, juhtimismooduli elektroonikaplaadi loomine ning korpuse loomine juhtimismoodulile. Need sammud viivad välja töötatud teststendi realiseerimiseni, mis võib oluliselt parandada ettevõtte aku testimise protsessi.

Kokkuvõttes näitab töö, et välja töötatud teststend on võimeline teostama ettevõtte poolt määratud teste ning tagama aku tõrgeteta toimimise vastavalt elektriratta nõuetele. Lisaks sellele annab töö ülevaate teststendi riistvaralisest ja tarkvaralisest arhitektuurist ning testimise läbiviimise protsessist, mis võimaldab hõlpsasti jälgida ja kontrollida aku käitumist erinevates olukordades.

SUMMARY

The name of the diploma thesis is Battery Testbench Development.

The author has completed a diploma internship in a company that deals with the development and production of electric bikes and batteries for them. Battery testing is an important stage in the battery development and production processes. This thesis is based on the topic of developing a test bench for battery testing. The thesis is aimed at solving problems related to battery testing, which exist at the time of writing the thesis. The main problems lie in the fact that battery testing takes a long time, in some cases testing is difficult and the human factor might have a large impact on the performance of tests.

Automation of testing using a test bench would allow optimization of the testing process and solve the existing problems. The aim of the diploma thesis is to develop an automatic test bench hardware solution for testing company batteries. The test bench must be able to carry out the tests specified by the company in automatic mode.

In the first and second chapters, the author described the construction and functionality of the company's battery. In the second chapter, the author analyzed the current battery testing process and its drawbacks and needs. The information and conclusions of the first and second chapters formed the basis for the development of a suitable test bench. The third chapter described the concept and electrical design of the billboard developed by the author of the diploma thesis. Also, the equipment and electronic components needed for the construction of the stand were selected, and a calculation was made to justify the choice of components. In the fourth chapter, the performance of the test bench testing process was described and two sample tests were described to prove that the solution developed is suitable for automation of testing and is able to improve the existing testing process of company batteries.

The result of the diploma thesis is a conceptual solution of the electrical part of the stand with the selected components and their interconnections. Next, it is needed to choose a suitable wiring and create an electronic board for the control module where the selected components can be installed. In addition, it is necessary to create a housing for the control module.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] VOK Bikes,, "VOK Bikes ettevõtte esileht" <https://vokbikes.com/business/>
- [2] VOK Bikes, "VOK Bikes elektriratta spetsifikatsioon" <https://vokbikes.com/wp-content/uploads/2023/06/Vok-XL-Technical-Specification-Sheet-2023.pdf>
- [3] "Patareide ja akude tüübid" <https://batteryuniversity.com/article/bu-302-series-and-parallel-battery-configurations>
- [4] "Series and parallel battery configurations" <https://batteryuniversity.com/article/bu-302-series-and-parallel-battery-configurations>
- [5] "What is battery management system?" <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-a-battery-management-system.html>
- [6] RaspberryPi 4B veebiandmeleht <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html#gpio-pads>
- [7] NUCLEO-F103RB spetsifikatsioon <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-f103rb.html#documentation>
- [8] Kvazer Leaf Light v2 andmeleht https://canlandbucket.s3-eu-west-1.amazonaws.com/productionResourcesFiles/bd3328ef-9712-452c-94c0-e61a875adade/73-30130-00685-0_EN_A4.pdf
- [9] IVT andmeleht https://www.isabellenhuetten.de/fileadmin/Daten/Praezisionsmesstechnik/IVT_Modular_datasheet_1.20.pdf
- [10] ALF1P05 võimsus relee tooteleht <https://www.digikey.ee/en/products/detail/panasonic-electric-works/ALF1P05/645554?s=N4IgTCBcDaIIIBkBiBGACgBgKwgLoF8g>
- [11] [Seung-Hyun Kim](#), "EV-relay performance analysis of reverse surge protection devices" <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7368442>
- [12] 2SD863F-AE transistori tooteleht <https://www.digikey.ee/en/products/detail/rochester-electronics-llc/2SD863F-AE/12130747>
- [13] PNP transistori arvutamise õpetus <https://www.es7club.ee/praktika/47-kuidas-kasutada-transistorit-lulitina>
- [14] TX2-5V signaalrelee tooteleht <https://www.digikey.ee/en/products/detail/panasonic-electric-works/TX2-5V/251803>
- [15] HLMP-1521 tooteleht <https://www.digikey.ee/en/products/detail/broadcom-limited/HLMP-1521/637562>
- [16] HLMP-3416 tooteleht <https://www.digikey.ee/en/products/detail/broadcom-limited/HLMP-3416/637600>

- [17] HLMP-1321 tooteleht <https://www.digikey.ee/en/products/detail/broadcom-limited/HLMP-1321/637558>
- [18] LED eeltakisti arvutamise õpetus <http://parsek.yf.ttu.ee/~felc/ak/Aabits5.pdf>
- [19] Hiina võimsustakisti tooteleht https://www.alibaba.com/product-detail/Braking-resistor-1kw-2kw-5kw-8kw_1601027754269.html?spm=a2700.7724857.0.0.53de22efD1exOa
- [20] DCDC pingemuundur https://www.aliexpress.com/item/1005005876635127.html?spm=a2g0o.productlist.main.1.78ed9OaI9OaI30&algo_pvid=22ffbb66-8723-4820-a09c-0db38c0da737&algo_exp_id=22ffbb66-8723-4820-a09c-0db38c0da737-0&pdp_npi=4@dis!EUR!6.01!6.01!!!6.33!6.33!@2101fb1517154044739877344e8779!12000035407183478!sea!EE!0!AB&curPageLogUid=ejz6TaQzNPO8&utparam-url=scene%3Asearch%7Cquery_from%3A
- [21] Võimsus takisti andmeleht https://www.mouser.ee/datasheet/2/418/8/ENG_DS_9_1773453_2_E-727943.pdf
- [22] MeanWell HLG-480H-48A andmeleht https://media.distrelec.com/Web/Downloads/t/ds/HLG-480H-24_eng_tds.pdf

LISAD

Lisa 1. Stendi kasutamise töövoo diagramm

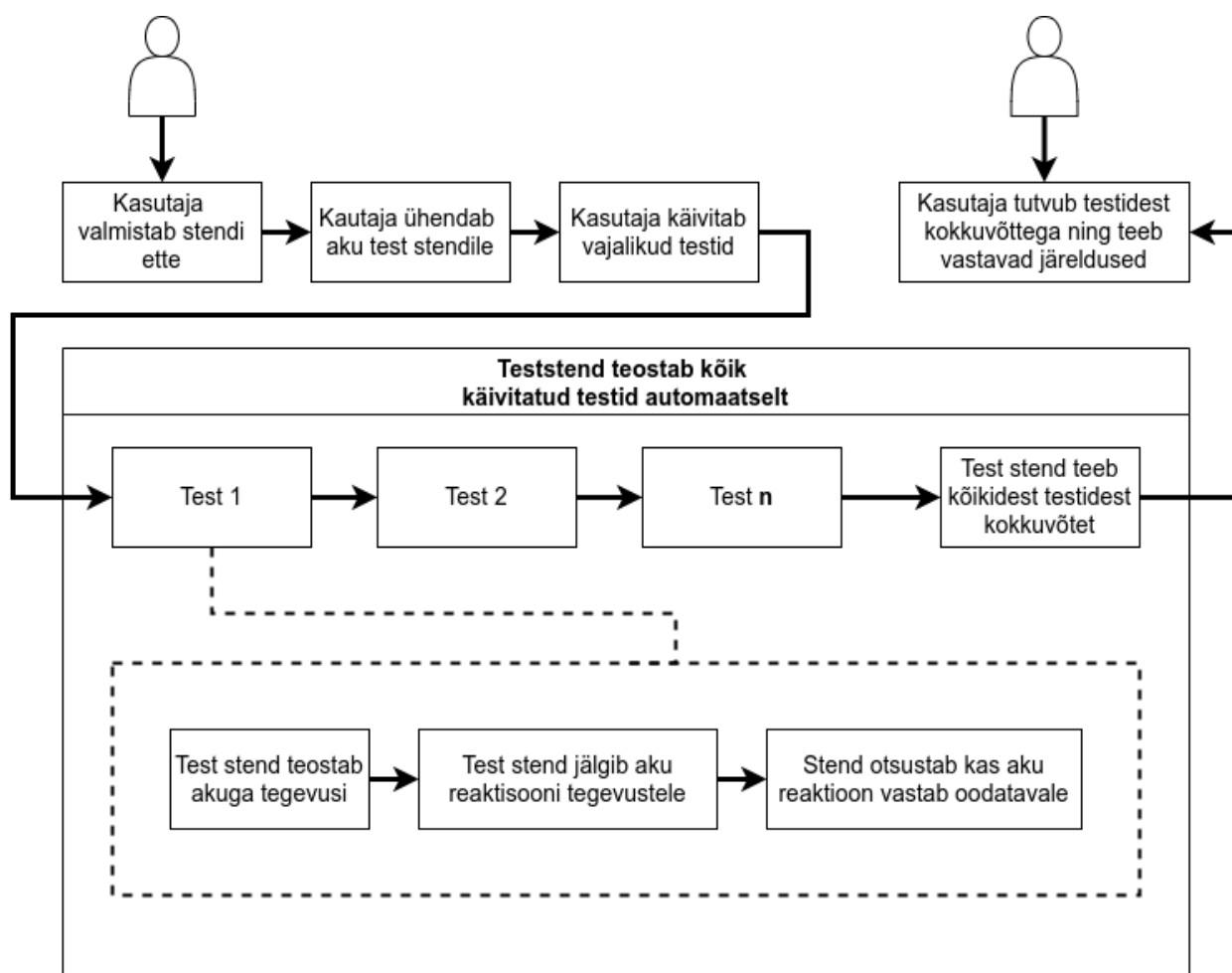
Lisa 2. Stendi hieraarhiline elektriskeem

Lisa 3. Juhtseadme GPIO signaalid

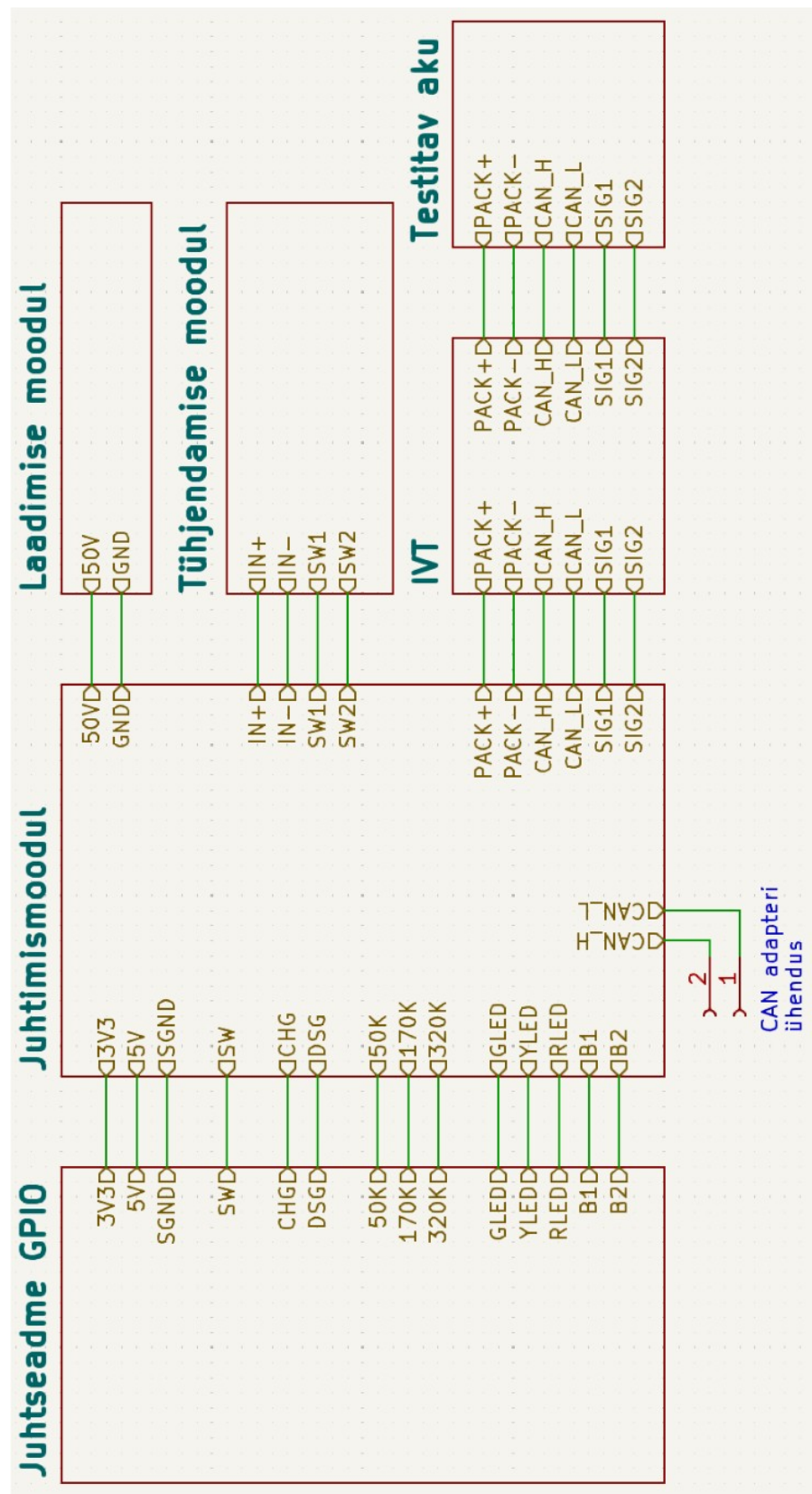
Lisa 4. Juhtimismooduli elektriline skeem

Lisa 5. Aku tühjendamise testi plokkskeem

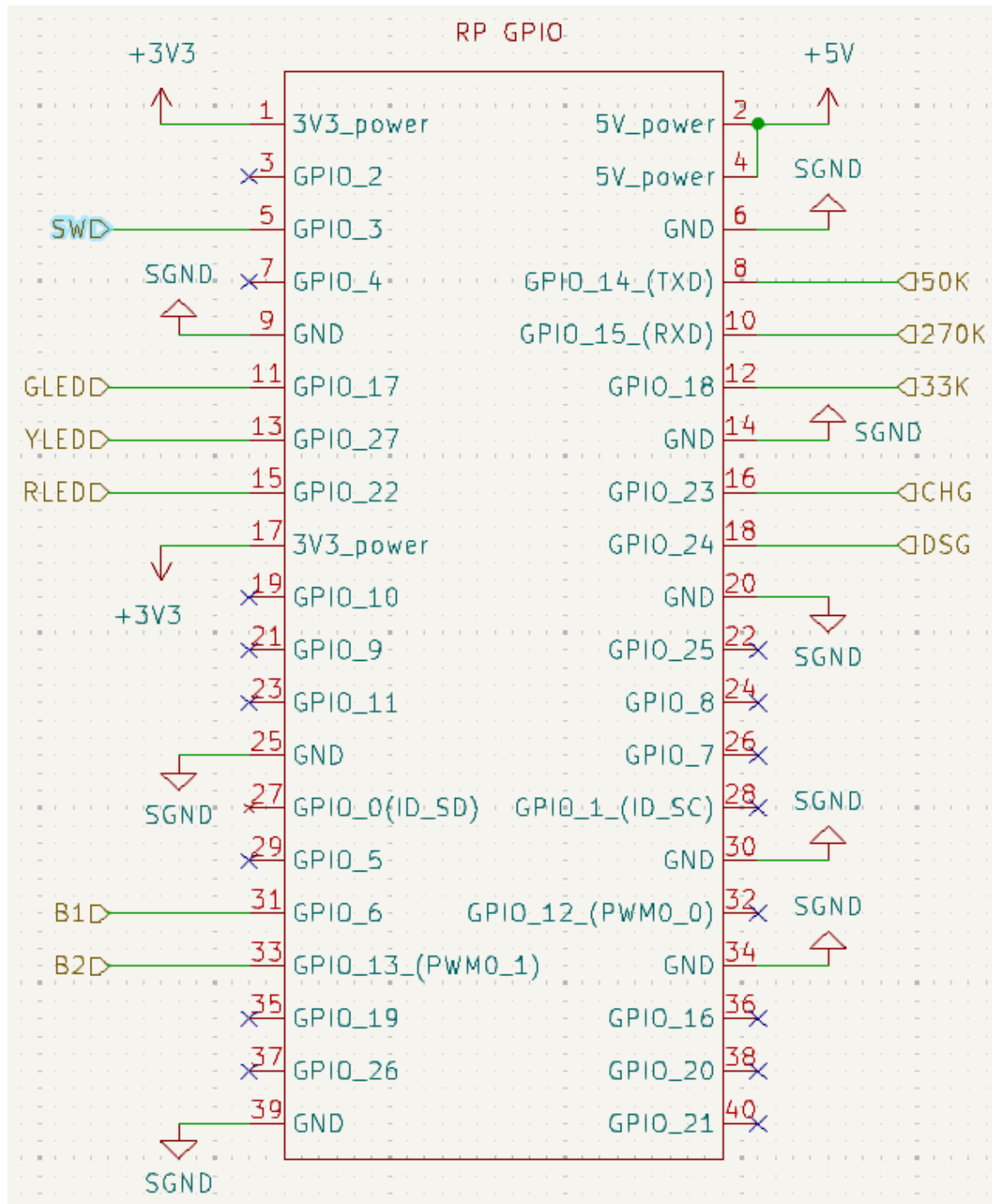
Lisa 1. Stendi kasutamise töövoov diagramm



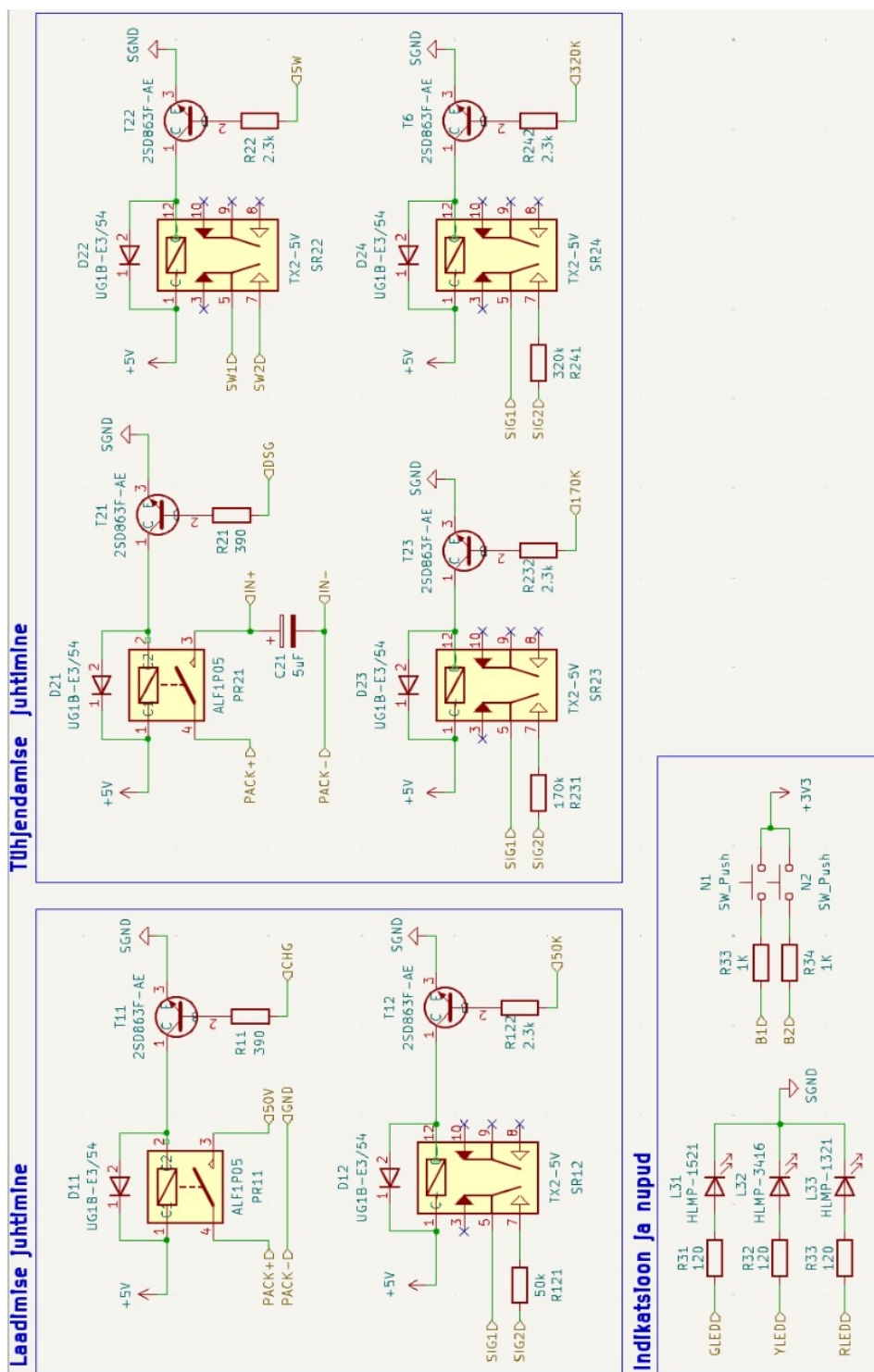
Lisa 2. Teststendi hieraarhiline elektriskeem



Lisa 3. Juhtseadme GPIO signaalid



Lisa 4. Juhtimismooduli elektriline skeem



Lisa 5. Aku tühjendamise testi plokkskeem

