



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Karolis Rudaitis

**ELEKTROMOBILIŲ BATERIJŲ BLOKO VALDYMO
GRANDINIŲ TYRIMAS IR KŪRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Marius Saunoris

KAUNAS, 2018

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTRONIKOS KATEDRA

**ELEKTROMOBILIŲ BATERIJŲ BLOKO VALDYMO
GRANDINIŲ TYRIMAS IR KŪRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas
Elektronikos inžinerija (621H61002)

Vadovas

(parašas) Doc. dr. Marius Saunoris

(data)

Recenzentas

(parašas) Prof. dr. Darius Gailius

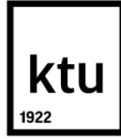
(data)

Projektą atliko

(parašas) Karolis Rudaitis

(data)

KAUNAS, 2018



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos

(Fakultetas)

Karolis Rudaitis

(Studento vardas, pavardė)

Elektronikos inžinerija 621H61002

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Elektromobilių baterijų bloko valdymo grandinių kūrimas ir tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 18 m. Gegužės 22 d.
_____ Kaunas _____

Patvirtinu, kad mano **Karolio Rudaičio** baigiamasis projektas tema „Elektromobilių baterijų bloko valdymo grandinių kūrimas ir tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Rudaitis, Karolis. Elektromobilių baterijų bloko valdymo grandinių kūrimas ir tyrimas. Elektronikos inžinerijos magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Marius Saunoris; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektronikos inžinerijos katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: *Elektromobilis, Baterijos, Baterijų valdymo sistema, Izoliacijos varžos matavimas, Balansavimas, Apsauga.*

Kaunas, 2018. 68 p.

SANTRAUKA

Elektromobilio baterijų blokas – vienas brangiausių ir svarbiausių elektromobilio komponentų, todėl patikimam jo veikimui turi būti skiriamas didelis dėmesys. Rinkoje egzistuojančios baterijų bloko valdymo sistemos nepasižymi lankstumu, pastebimas prastas suderinamumas su kitais elektromobilio galios mazgais. Šiame darbe bus projektuojamos baterijų bloko valdymo grandinės, kurios užtikrintų patikimą ir sklandų baterijų bloko veikimą. Sistemoje realizuojamos privalomos baterijų bloko saugumo funkcijos.

Išanalizavus kitų elektromobilių gamintojų naudojamus sprendimus, pasirinkta priimtinausia sistemos struktūra. Projektuojama sistema skirta naudoti įvairų baterijų kiekį turinčiose baterijų dėžėse, todėl prijungiant baterijas reikalingas sistemos lankstumas. Ištyrus literatūros šaltinius apie elektromobilius, pasirinktas centrinio valdymo bloko su nutolusiais baterijų bloko celių įtampos, temperatūros matavimo ir balansavimo moduliais tipas. Norint užtikrinti baterijų bloko ilgaamžiškumą reikia sekti baterijų gamintojo nurodomus baterijų veikimo parametrus: darbinę įtampą, temperatūrą, srovę. Baterijos dėl cheminių procesų senėja ir išsikrauna nevienodai, todėl reikalingos papildomos baterijų įtampos balansavimo grandinės, kurios suvienodina baterijų įkrovos lygį tarp visų bloką sudarančių baterijų. Baterijų bloką eksploatuojant neigiamoje temperatūroje reikalingas papildomas šildymas. LiFePO₄ baterijas galima įkrauti 0 °C ~ 45 °C, iškrauti -20 °C ~ 55 °C temperatūroje. Baterijų bloke privaloma matuoti aukštos įtampos kabelių izoliacijos varžą, kuri negali viršyti 500 Ω/voltui. Suprojektuota baterijų bloko valdymo sistema, kuri gali matuoti baterijų temperatūras nuo -50 °C iki 150 °C, matuoti individualių baterijų įtampas nuo 1 iki 5 V, balansuoti visas baterijų bloko celes. Taip pat matuoti baterijų bloko srovę nuo $\pm 0.1\text{ A}$ iki $\pm 500\text{ A}$. Eksperimentinių tyrimų metu išbandytas sistemos veikimas. Sistema gali aptikti izoliacijos varžos pažeidimus, kurie sukelia nepageidaujamą įtampos nuotėkį. Realizuotas sistemos minkštas paleidimas, galios kondensatorių įkrovimui. Įgyvendintos papildomos apsaugos funkcijos aptarnaujančiam personalui: serviso atjungimas, aukštos įtampos atjungimas. Sukurtas sistemos veikimo algoritmas leidžia efektyviai valdyti baterijų bloką. Tyrimų rezultatai patvirtino sklandų visų suprojektuotų grandinių veikimą.

Rudaitis, Karolis. Design and Investigation of Electric Vehicle Battery Pack Management System. Master's thesis in Electronics Engineering / supervisor assoc. prof. Marius Saunoris. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electronics Engineering.

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: Electric vehicle, Battery, Battery Management System, Isolation fault measurement, Balancing, Protection.

Kaunas, 2018. 68 p.

SUMMARY

Electric vehicle battery pack is one of the most expensive and important components of the car, for its reliable functionality additional attention must be given. Battery control modules at the market lacks functionality and connecting compatibility with other electric car modules. In this thesis battery pack control circuitry will be designed, which ensures safe and reliable battery pack working. Additional safety features will be also realized.

After analyzing other electric vehicle manufacturers used battery pack control solutions, the most suitable system structure was chosen. Central control unit with remote battery voltage and temperature measurement and balancing units was chosen. To ensure battery pack longevity, battery cell manufacturer claimed battery working conditions must be ensured: working voltage, temperature and current. Batteries for its inner chemical process tends to discharge differently, to avoid voltage variation between cells additional balancing circuitry must be used. Additional heater for battery is necessary if pack is used in negative temperature. LiFePO₄ batteries can be charged in 0 °C ~ 45 °C temperature and discharged -20 °C ~ 55 °C temperature. Battery pack insulation must be measured to ensure user safety and it must be higher than 500 Ω/volt. Battery pack control system was implemented, which is capable to measure cell temperature from -50 °C to 150 °C, measure every single cell voltage from 1 V to 5 V, balance all batteries in the pack. Measure battery pack current from $<\pm 0.1$ A to ± 500 A. After carrying out experimental studies system operation was tested. System is capable to indicate battery pack insulation fault. System soft start function was implemented for charging up system's high-power capacitors. Additional circuitry was made to ensure battery pack assisting personal safety, service disconnect, high voltage cable disconnect. Efficient system working algorithm was created. Experimental studies confirmed smooth system performance.

TURINYS

| | |
|---|----|
| SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS..... | 8 |
| ĮVADAS..... | 9 |
| 1. ANALITINĖ DALIS | 10 |
| 1.1. Elektromobilių tipai..... | 10 |
| 1.1.1. BEV tipo elektromobilio struktūra | 11 |
| 1.1.2. Baterijų tipai naudojami elektromobiliuose..... | 12 |
| 1.2. Baterijų bloko elektronikos grandinės..... | 14 |
| 1.2.1. Baterijų įtampų matavimo ir balansavimo integriniai grandynai..... | 15 |
| 1.2.2. Baterijų bloko celių balansavimo metodai | 17 |
| 1.2.3. Srovės matavimo metodai..... | 19 |
| 1.2.4. Temperatūros matavimo metodai..... | 20 |
| 1.2.5. Izoliacijos varžos įvertinimo metodas | 21 |
| 1.2.6. Baterijų bloko celių įtampų matavimas | 23 |
| 1.3. Saugumo reikalavimai baterijoms ir valdymo grandinėms | 24 |
| 1.4. Apibendrinimai | 26 |
| 2. PROJEKTINĖ DALIS | 27 |
| 2.1. Baterijų bloko modeliavimas..... | 27 |
| 2.1.1. Baterijų bloko modelio sudarymas baterijų senėjimo tyrimui | 28 |
| 2.1.2. Teorinis baterijų bloko senėjimo tyrimas | 32 |
| 2.1.3. Baterijų bloko balansavimo trukmės įvertinimas..... | 36 |
| 2.2. Baterijų bloko valdymo grandinių projektavimas..... | 37 |
| 2.2.1. Sistemos veikimo algoritmas | 38 |
| 2.2.2. Izoliacijos varžos matavimo grandinės | 41 |
| 2.2.3. Minkšto paleidimo, kontaktorių ir šildytuvo valdymo grandinės | 43 |
| 2.2.4. Baterijų bloko valdymo grandinių maitinimo šaltinių projektavimas..... | 46 |
| 2.2.5. Komunikacinių grandinių realizavimas..... | 47 |
| 2.2.6. Baterijų bloko celių įtampos nuskaitymo ir balansavimo valdymo grandinės | 49 |
| 2.2.7. Baterijų srovės matavimo grandinė..... | 50 |

| | |
|--|----|
| 2.2.8. Baterijų bloko temperatūros matavimo grandinės | 51 |
| 2.2.9. PCB projektavimas | 52 |
| 2.3. Apibendrinimai | 53 |
| 3. EKSPERIMENTINĖ DALIS | 54 |
| 3.1. Baterijų bloko celių įtampos matavimo tyrimas | 56 |
| 3.2. Baterijų bloko celių balansavimo tyrimas | 57 |
| 3.3. Baterijų bloko izoliacijos varžos matavimo tyrimas | 59 |
| 3.4. Baterijų bloko įkrovos lygio tyrimas | 61 |
| 3.5. Srovės matavimo tyrimas | 62 |
| 3.6. Temperatūros matavimo tyrimas | 63 |
| 3.7. Sistemos minkšto paleidimo ir kontaktorių valdymo tyrimas | 64 |
| IŠVADOS IR PASIŪLYMAI | 66 |
| INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS | 67 |
| PRIEDAI | 70 |
| Priedas 1. Įkrovimo kabelių standartai, krovimo režimai | 70 |
| Priedas 2. Izoliuojančių transformatorių modeliavimas LT Spice | 72 |
| Priedas 3. PCB sluoksnių vaizdas | 74 |

SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

| | |
|--------------|--|
| BMS | Baterijų valdymo sistema (<i>angl. Battery Managment system</i>) |
| DC-DC | Keitiklis iš nuolatinės srovės į nuolatinę (<i>angl. Direct current to direct current</i>) |
| AC-DC | Keitiklis iš kintamos srovės į nuolatinę (<i>angl. Alternat current to direct current</i>) |
| CAN | Valdiklio srities tinklas (<i>angl. Controller Area Network</i>) |
| IG | Integrinis grandynas |
| SPI | Serijinė periferijos sąsaja (<i>angl. Serial Peripheral Interface</i>) |
| SOC | Įkrovos lygis (<i>angl. State of Charge</i>) |
| NTC | Neigiamas temperatūrinis koeficientas (<i>angl. Negative Temperature Coefficient</i>) |
| PCB | Spausdintinio montažo plokštė (<i>angl. Printed circuit board</i>) |
| UART | Universalus asinchroninis imtuvas-siųstuvas (<i>angl. Universal Asynchronous Receiver – Transmitter</i>) |
| SMD | Paviršinio montažo komponentas (<i>angl. Surface-Mount Device</i>) |
| PTC | Teigiamas temperatūrinis koeficientas (<i>angl. Positive Temperature Coefficient</i>) |

IVADAS

Pastaruoju metu elektromobilių rinka smarkiai auga. Taip pat auga paklausa elektromobilius sudarančios sistemos elektronikai. Didieji gamintojai, pavyzdžiui, „Nissan“, „Tesla“, „Toyota“, „BMW“ elektronikos sistemas reikalingas elektromobilio veikimui projektuoja ir gamina patys. Rinkoje esančios nedidelės įmonės, kurių pagaminamų elektromobilių skaičius nesiekia 100 vienetų per metus, dažniausiai linkę naudoti standartinius sprendimus valdymo elektronikoje. Tačiau, kai kalba eina apie elektromobilius ir jų baterijų blokus, standartinių sprendimų valdymo elektronikoje yra labai nedaug, o gamintojams keliami elektronikos saugumo ir patikimumo reikalavimai veda prie nestandartinių produktų kūrimo.

Baterijų blokas – viena esminių ir brangiausių elektromobilio dalių. Daug dėmesio turi būti skirta vartotojo apsaugai nuo galimų pavojų, tokių kaip elektros šokas ar sprogimas dėl trumpo jungimo. Ne ką mažiau svarbus ir baterijų bloko ilgaamžiškumo užtikrinimas. Užtenka vieną kartą iškrauti baterijų bloką iki žemesnės nei leidžiama įtampos arba įkrauti iki didesnės nei leidžiama įtampos ir baterijų blokas gali būti sugadintas nepataisomai. Tam tikslui kuriamos baterijų bloko stebėsenos sistemos, kurios ne tik užtikrina tinkamą baterijų krovimą ir iškrovimą, atlieka celių įtampų balansavimą, bet ir realiu laiku stebi šiuos baterijų bloko parametrus: temperatūrą, įtampą, įkrovimo/iškrovimo srovę.

Izoliacijos varžos matuoklis yra labai svarbus baterijų bloko komponentas, užtikrinantis elektromobiliu besinaudojančių asmenų saugą. Praktikoje gana dažnai pasitaiko atvejų, kai dėl prasto kontakto ar aukštos įtampos kabelio pažeidimų automobilio kėbulas įgauna baterijos bloko potencialą. Siekiant išvengti gyvybei pavojingų padarinių yra reikalingas aktyvus baterijų bloko izoliacijos varžos matavimas, kuris remiantis 100 elektromobilių saugos taisykle turi būti 100 Ω /voltui esant kintamai įtampai, arba 500 Ω /voltui esant nuolatinei įtampai.

Darbo tikslas – suprojektuoti ir ištirti elektromobilio baterijų bloko valdymo grandines. Tikslui pasiekti iškeliami šie uždaviniai:

1. Atlikti elektromobilio baterijų bloko struktūros ir ją sudarančių grandinių analizę;
2. Atlikti kritinių sistemos komponentų parinkimo analizę;
3. Atlikti elektromobilio baterijų bloko veikimo modeliavimą;
4. Suprojektuoti elektromobilio baterijų bloko valdymo grandines;
5. Atlikti elektromobilio baterijų bloko valdymo grandinių eksperimentinius tyrimus įvertinant modeliavimo metu gautus rezultatus.

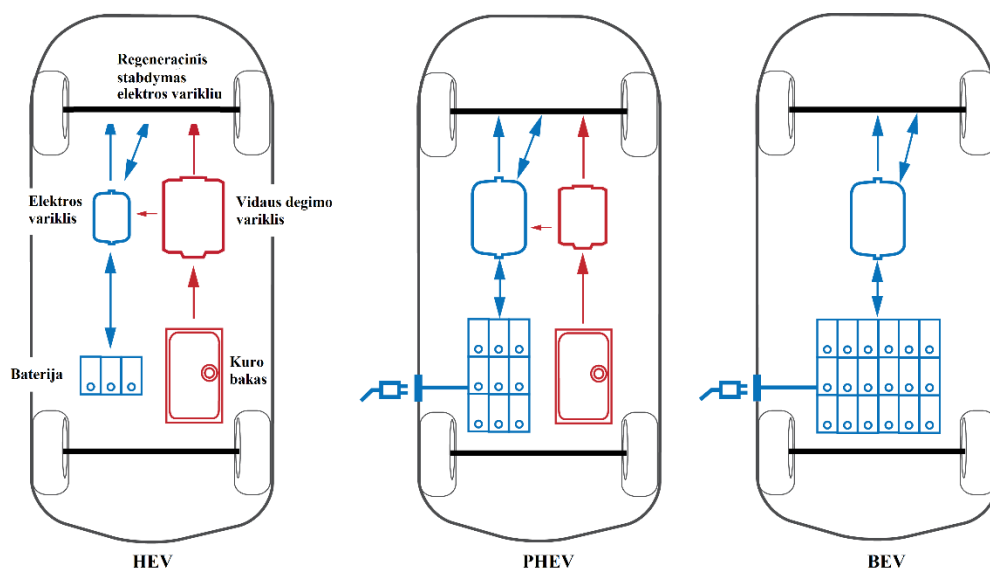
1. ANALITINĖ DALIS

Šioje dalyje bus trumpai aptarti elektromobilių tipai ir juos sudarantys elektronikos mazgai. Apžvelgti mokslinių šaltinių duomenys susiję su elektromobilių baterijų bloko elektronika. Be to, aptarti elektromobilių aukštos įtampos galios grandinių saugos reikalavimai.

1.1. Elektromobilių tipai

Hibridiniai elektromobiliai naudoja tiek vidaus degimo variklį, tiek elektros variklį. Baterijų bloko įkrovimas vykdomas stabdymo regeneracijos metu arba vidaus degimo variklio sukamu elektros generatoriumi. Įkraunami hibridiniai elektromobiliai panašūs į prieš tai minėtus, tačiau turi galimybę baterijų bloką įkrauti iš elektros tinklo. Elektriniai automobiliai sistemoje neturi vidaus degimo variklio, didesnis nuvažiuojamas atstumas įmanomas tik padidinus baterijų bloko talpą [1]. 1.1.1 paveikslėlyje pateiktas skirtingų elektromobilių tipų vidinės struktūros vaizdas.

- HEV (*angl. Hybrid Electric Vehicles*) Hibridiniai elektromobiliai;
- PHEV (*angl. Plug in Hybrid Vehicles*) Įkraunami hibridiniai elektromobiliai;
- BEV (*angl. Battery Electric Vehicle*) Visiškai elektriniai automobiliai.



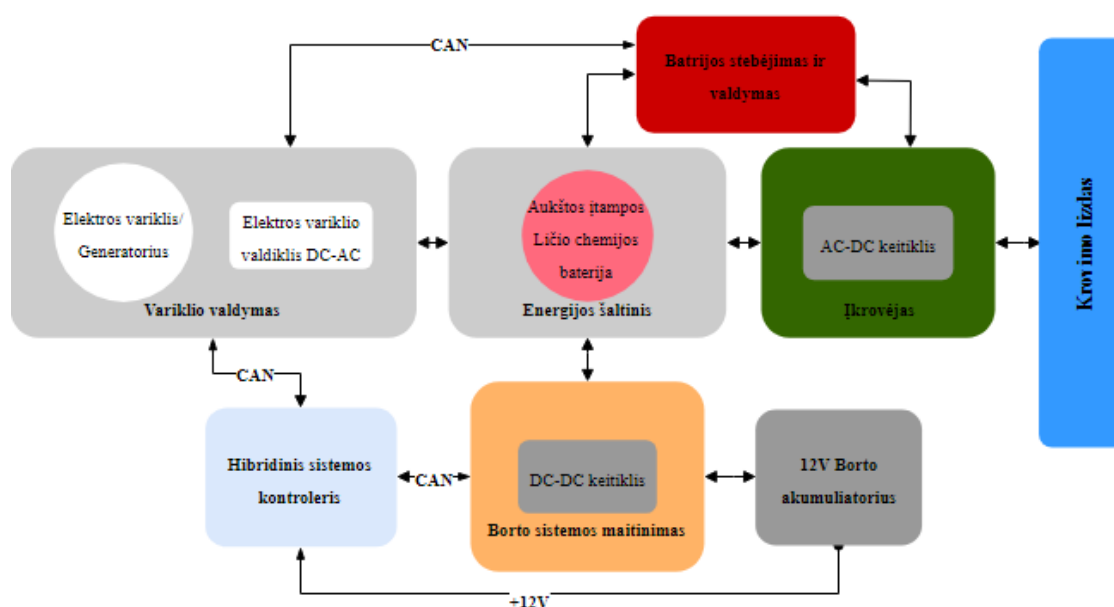
1.1.1 pav. Elektromobilių tipai [1].

Sistemoms be vidaus degimo variklio reikalingas didesnis baterijų blokas. Tačiau nepriklausomai nuo baterijų bloko dydžio, bloką valdančios grandinės išlieka tokios pat. Šio darbo metu projektuojama baterijų bloko valdymo sistema bus orientuota į PHEV ir BEV tipo elektromobilius. PHEV ir BEV tipo elektromobiliai savo elektros grandinių struktūra yra labai artimi. Esminis skirtumas – BEV naudojama ženkliai didesnės talpos baterija.

1.1.1. BEV tipo elektromobilio struktūra

Daugumos elektromobilių viduje dažniausiai yra tie patys sisteminiai blokai. Papildomi sisteminiai blokai montuojami hibridiniuose elektromobiliuose, dėl galimybės vienu metu naudotis tiek vidaus degimo varikliu, tiek elektros varikliu arba vienu iš jų. Esminiai sistemos blokai matomi 1.1.1.1 paveikslėlyje.

- Įkrovimo lizdas su galios ir įkrovimo stotelės valdymo kontaktais, Europoje dažniausiai sutinkamas IEC 62196 - 1, 2, 3, 4 tipai (daugiau informacijos 1 priede);
- Įkroviklis -AC/DC (pastovios srovės ir įtampos šaltinis) valdomas CAN protokolu;
- Baterijų blokas + bloko stebėjimo ir valdymo sistema;
- DC/DC keitiklis žemos įtampos elektromobilio grandinėms maitinti;
- Variklio valdiklis.



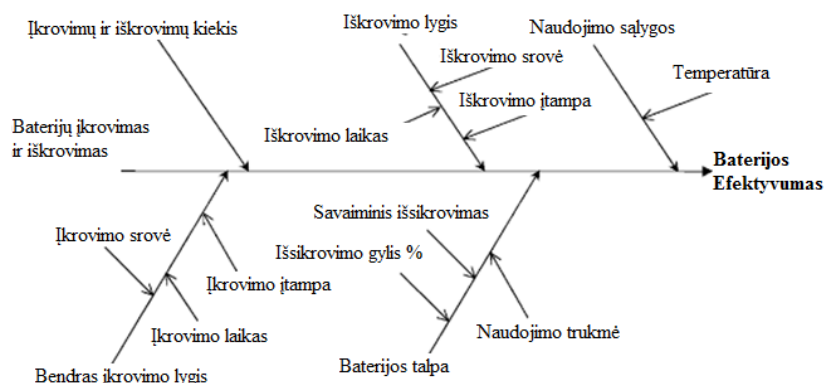
1.1.1.1 pav. Elektromobilio elektros grandinių struktūra [2].

Elektromobilio sistema susideda iš daugybės elementų nuo elektrinės pavaros iki baterijų bloko. Tipinis baterijų blokas sudarytas iš ličio jonų akumuliatorių, kurių bendra įtampa siekia iki 400 V. Baterijų bloko veikimas stebimas ir valdomas BMS sistema. Baterijų krovimas atliekamas integruotu AC-DC krovikliu veikiančiu nuo 110 V vienos fazės iki 380 V trijų fazių elektros lizdo. Variklio valdiklis atlieka dvigubą funkciją: aukštą baterijų bloko nuolatinę įtampą verčia į kintamą įtampą variklio valdymui, o stabdymo metu varikliu regeneruojamą kintamą įtampą verčia į nuolatinę įtampą naudojamą baterijų bloko krovimui. Likusi elektromobilio elektronikos dalis veikia žema +12 V įtampa, todėl reikalingas papildomas DC-DC 400-12 V keitiklis. Sistemoje

naudojami komponentai turi atitikti AEC Q-100 reikalavimus [3], o sistema tenkinti elektromobilių saugos reikalavimus.

1.1.2. Baterijų tipai naudojami elektromobiliuose

Elektromobilių rinkoje baigia išnykti švino rūgštiniai akumulatoriai dėl prasto tūrio/svorio ir sukaupiamos energijos kiekio santykio (detalesnė informacija pateikta 1.1.2.1 lentelėje). Švino akumulatoriai vis dar naudojami kaip rezerviniai (borto) energijos šaltiniai iki tol kol elektromobilyje pradeda veikti įtampos keitiklis, mažinantis baterijų bloko įtampą į 12 V įtampą. Dažniausiai elektromobiliuose paplitusios įvairios ličio ir kitų junginių atmainos. Naudojant skirtingas baterijos anodo ir katodo medžiagas sukuriamos dar įvairesnes charakteristikas turinčios baterijų rūšys. Skirtingos anodo ir katodo medžiagų kombinacijos turi nemažai privalumų: efektyvumas, saugumas, ciklų skaičius. Renkantis akumulatorius svarbu atkreipti dėmesį į jo parametrus ir charakteristikas[4]. 1.1.2.1 paveikslėlyje pateikti baterijų bloko efektyvumą lemiantys kriterijai.



1.1.2.1 pav. Pagrindiniai baterijų parametrai [5].

- Talpa ampervalandėmis – parametras žymimas (Ah). Apibrėžiamas kaip pilnai įkrautos baterijos iškrovimas fiksuota srove per valandą. Šis dydis priklauso nuo akumulatoriaus temperatūros ir iškrovimo srovės dydžio. Baterijos talpa taip pat gali būti surandama naudojantis 1 formule.

$$\text{Deklaruojama talpa Ah} = \text{Deklaruojamas Wh kiekis} / \text{Deklaruojama baterijos įtampa} \quad (1)$$

- Nominalus C rodiklis – šis parametras žinomas kaip iškrovimo srovė, kuri apibrėžiama baterijos iškrovimo rodikliu pilnai įkrautos baterijos talpos atžvilgiu. Iškrovimo rodiklis C tiesiogiai koreliuoja su akumulatoriaus gebėjimu palaikyti pastovią išėjimo srovę valandai, akumulatoriaus darbinės įtampos diapazone.
- Savitoji energija – šis parametras apibrėžia, koks kiekis energijos Wh telpa 1 kg akumulatoriuje.

- Energetinis tankis – nominali baterijos energija tūrio vienetu (Wh/m³).
- Galios tankis – maksimali išėjimo galia tūrio vienetu (W/m³).
- Maksimali galia – apibrėžiama akumulatoriaus galimybe 30 sekundžių atiduoti maksimalią išėjimo galią, su prielaida, kad baterijos įtampa nenukris trečdaliu mažiau negu nesant apkrovai. Preliminari maksimali galia gali būti apskaičiuojama 2 formule: [6]

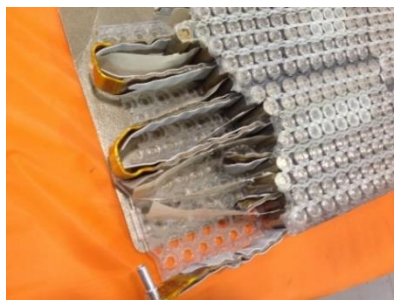
$$P = \frac{2V^2}{9R} \quad (2)$$

V – baterijos įtampa be apkrovos, R – baterijos vidinė varža.

1.1.2.1 lentelė. Akumuliatorių palyginimas[7].

| Specifikacija | Švino | NiCd | NiMh | Li-Ion | | |
|-----------------------------------|-------------|-------------------------|-------------------|----------------------|-------------|-------------|
| | | | | Kobaltas | Manganas | Fosfatas |
| Savitoji energija (Wh/kg) | 30-50 | 45-80 | 60-120 | 180-190 | 100-135 | 90-120 |
| Vidinė varža (mΩ/V) | <8.3 | 17-33 | 33-50 | 21-42 | 6.6-20 | 7.6-15.0 |
| Ciklų skaičius (80% iškrova) | 200-300 | 1000 | 300-500 | 500-1000 | 500-1000 | 1000-2000 |
| Greito įkrovimo trukmė h. | 8-16 | 1 | 2-4 | 2-4 | <1 | <1 |
| Atsparumas perkrovimui | Didelis | Vidutinis | Mažas | Mažas | Mažas | Mažas |
| Savaiminis išsikrovimas/mėn. | 5-15% | 20% | 0% | <5% | <5% | <5% |
| Celės įtampa | 2 | 1.2 | 1.2 | 3.6 | 3.8 | 3.3 |
| Pilnai pakrautos celės įtampa | 2.4 | Stebimas kritimas | Stebimas kritimas | 4.2 | 4.2 | 3.6 |
| Pilnai iškrautos celės įtampa | 1.75 | 1 | 1 | 2.5-3 | 2.5-3 | 2.8 |
| Maksimali išėjimo srovė | 5C | 20C | 5C | >3C | >30C | >30C |
| Maksimali ilgalaikė išėjimo srovė | 0.2C | 1C | 0.5C | <1C | <10C | <10C |
| Krovimo temperatūra | -20 - 50 °C | 0 - 45 °C | 0 - 45 °C | 0 - 45 °C | 0 - 45 °C | 0 - 45 °C |
| Iškrovimo temperatūra | -20 - 50 °C | -20 - 65 °C | -20 - 65 °C | -20 - 60 °C | -20 - 60 °C | -20 - 60 °C |
| Priežiūra | 3 - 6 mėn. | 30 - 60d. | 30 - 60d. | Nereikia | nereikia | nereikia |
| Saugumo reikalavimai | Temperatūra | Temperatūra + saugiklis | | Apsauginės grandinės | | |
| Tarnavimo trukmė metais | | | | >10 | >10 | >10 |
| Toksiškumas | Didelis | Didelis | Mažas | Didelis | Mažas | Mažas |

- Li-ion (ličio jonų) baterijos dažniausiai sutinkamos 18650 tipo korpuse. Išardyto akumuliatorių segmento vaizdas pateiktas žemiau, 1.1.2.2 paveikslėlis.



1.1.2.2 pav. Li-Ion 18650 tipo celių blokas [8].

- LiFePO_4 (ličio geležies fosfato) baterijos dažniausiai sutinkamos prizmatiniame (1.1.2.3 pav.) arba cilindro formos pavidale.



1.1.2.3 pav. Ličio geležies fosfato celė [9].

- Li-Po (ličio polimerų) baterijos dažniausiai sutinkamos prizmatiniame pavidale (1.1.2.4 pav.).



1.1.2.4 pav. Nissan LEAF ličio polimerų celė [10].

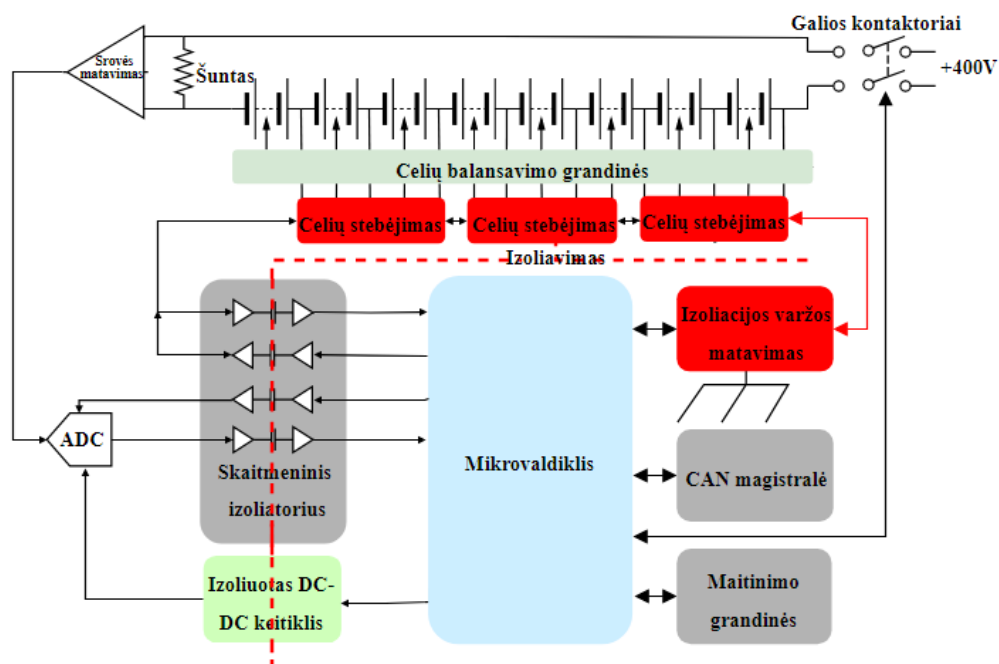
Ličio baterijos savo savybėmis labiausiai tinka elektrinėms transporto priemonėms tiek dėl didelio energijos tankio, tiek dėl greito įkrovimo galimybės. Ličio baterijų įtampa yra didesnė nei švino ar nikelio baterijų, todėl nereikia tokio didelio celių kiekio norint išgauti tą pačią įtampą. Elektromobiliuose sutinkamos tiek Ličio jonų, tiek Ličio Polimerų ar Ličio Geležies Fosfato baterijos.

1.2. Baterijų bloko elektronikos grandinės

Akumuliatorių bloko BMS sistema yra viena pagrindinių elektromobilio sudedamųjų dalių. Jos pagalba prailginamas elektromobilio baterijos tarnavimo laikas, įkrovimo ir iškrovimo ciklų kiekis. Tai leidžia elektromobilio vartotojui maksimaliai išnaudoti elektromobilį kaip transporto priemonę, gaunant maksimalų nuvažiuojamą atstumą.

Elektromobiliui startuojant maksimali nuolatinė srovė siekia keletą šimtų amperų. Smarkiai išauga elektromagnetiniai trikdžiai, kurie triukšmu užteršia matavimo ir komunikacines grandines. Siekiant sistemos atsparumo triukšmui, vengiama ilgų analoginių signalų laidų. Elektromobilio konstrukcija dažniausiai baterijų bloką leidžia montuoti tik po elektromobilio kėbulu, todėl pageidaujamas plokščias baterijų dėžės dizainas. Naudojant centralizuotą BMS neišvengiami ilgi laidai tarp akumuliatoriaus celių ir stebėjimo sistemos analoginių įėjimų. Neretai pasirenkamas

optimalusis sprendimas naudoti nutolusius BMS modulius su viena centrine. 1.2.1 paveikslėlyje pateikiama supaprastinta BMS struktūros diagrama.



1.2.1 pav. BMS sistemos blokinė diagrama.

Sistemą sudaro celių įtampos stebėjimo ir balansavimo grandinės, priklausomai nuo BMS valdiklio gamintojo galimi įvairūs baterijų kiekio palaikymo variantai. Dažniausiai sutinkami 1S, 6S, 12S, 16S variantai. Taip pat į sistemą įeina DC linijos srovės matavimo grandinė, apsauginių galių kontaktorių valdymo grandinė. Baterijų celių temperatūros matavimo sensoriai. Baterijos temperatūros stebėjimas vienas iš kritinių parametru, krovimo metu baterijų temperatūra neturėtų būti neigiama ir tuo pačiu neviršyti 45°C. Iškvovimo metu galimas darbinis režimas -20°C iki 60°C. Esant netinkamam temperatūriniam režimui baterijos smarkiai degraduoja, prarandama talpa, sumažėja ciklų skaičius.

1.2.1. Baterijų įtampų matavimo ir balansavimo integriniai grandynai

Baterijų stebėjimo ir balansavimo IG pasirinkimas ribotas (1.2.1.1 lentelė). Elektromobiliams tinkamų BMS valdiklių skaičius dar mažesnis, nes dalis pateiktų IG nepalaiko galimybės sujungti nuosekliai didesnio kiekio valdiklių.

1.2.1.1 lentelė. BMS IG palyginimas.

| Jungiami nuosekliai | Integrinis grandynas | 100vnt. kaina | Cėlės/IG | Eur/celei |
|---------------------|-----------------------------|---------------|----------|-----------|
| Taip | Maxim MAX17823 | 22,92 | 12 | 1,91 |
| Taip | Texas Instruments bq76PL455 | 29,84 | 16 | 1,86 |
| Taip | Texas Instruments bq76PL536 | 7,47 | 6 | 1,24 |
| 2 x | AMS AS8506 | 7,93 | 7 | 1,13 |

| | | | | |
|------|-------------------------------|-------|----|------|
| Ne | Intersil ISL9216* | 5,24 | 5 | 1,05 |
| Taip | Linear Technology LTC6804 | 11,88 | 12 | 0,99 |
| Taip | Analog Devices AD7280 | 5,57 | 6 | 0,93 |
| Taip | Linear Technology LTC6803 | 10,81 | 12 | 0,90 |
| Taip | Linear Technology LTC6802 | 10,81 | 12 | 0,90 |
| Taip | Atmel ATA6870 | 4,73 | 6 | 0,79 |
| Ne | Intersil ISL94200 / ISL94201* | 4,81 | 7 | 0,69 |
| Ne | Texas Instruments bq78PL114 | 7,74 | 12 | 0,64 |
| Taip | Maxim DS2726 | 4,66 | 10 | 0,47 |
| Taip | Linear Technology LTC6801 | 5,45 | 12 | 0,45 |
| Ne | Texas Instruments bq77PL900* | 4,52 | 10 | 0,45 |
| Taip | Maxim MAX11080 | 3,07 | 12 | 0,26 |
| Ne | Intersil ISL9208* | 0,77 | 7 | 0,11 |

Elektromobilių rinka dar jauna, gamintojai taiko tik naujausias technologijas, naudoja naujausius elektronikos komponentus. Norint geriau suprasti kokia linkme žengia gamintojai, verta išanalizuoti, kaip sukonfigūruotos jų BMS sistemos ir kokius komponentus juose naudoja. Šaltinyje [11] atliekama rinkoje esančių elektromobilių baterijų bloko elektronikos analizė. Lentelėje 1.2.1.2 pateikiami keleto žinomiausių elektromobilių gamintojų BMS sistemų duomenys. Nesunku pastebėti, kad dažniau sutinkama modulinio BMS struktūra, kuri atsparesnė triukšmams ir lengviau aptarnaujama, nei centralizuota BMS sistema.

1.2.1.2 lentelė. BMS tipų palyginimas elektromobiliuose.

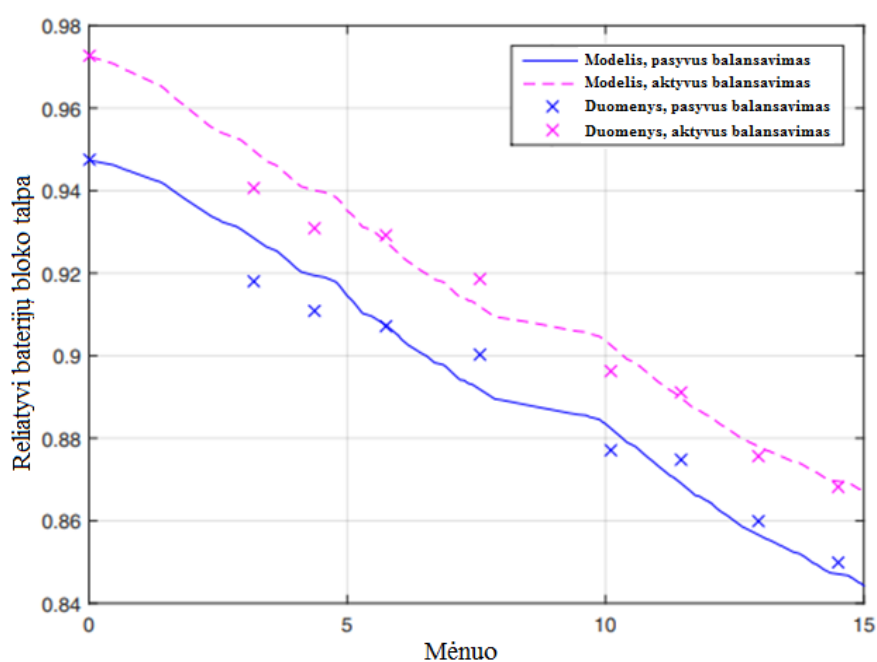
| Modelis | BMS IG modelis | Palaikomas celių skaičius | Komunikacija su centriniu bloku | BMS architektūra | Talpa, kWh | Įtampa, V |
|-------------------|----------------|---------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------|-----------|
| Ford Fusion | AD7280 | 6 | SPI Daisy Chain | Centralizuotas 1 PCB | 1.4 | 275 |
| Chevrolet Malibu | HCC03LLV1018 | 6 | Serial Daisy chain | Centralizuotas 1 PCB | 0.5 | 115 |
| Chevrolet Volt | L9763 | 8 | SPI Daisy Chain | 4 moduliai + centrinis blokas | 16 | 360 |
| Mitsubishi I-MiEV | LTC6802G-2 | 12 | SPI Daisy Chain | 11 modulių + centrinis blokas | 16 | 88 |
| Nissan Leaf | DS15110 | 4 | UART interface | Centralizuotas 1 PCB | 24 | 360 |
| Toyota Prius | 2P25 SF367 | 4 | Serial Daisy chain | 4 moduliai + centrinis blokas | 4.4 | 207 |
| BMW i3 | LTC6802G-2 | 12 | CANbus | 8 moduliai | 22 | 360 |

Elektromobiliams, kurių darbinė įtampa didesnė negu 150V privalomos papildomos saugumo priemonės stebinėsios aukštos įtampos laidų izoliacijos varžą. Ši funkcija dažniausiai integruojama į centrinį BMS modulį. Apibendrinus matyti, kad populiariesni didesni celių skaičių palaikantys IG, taip pat dažniausiai sutinkamas SPI komunikacijos tipas tarp celių stebėjimo ir balansavimo IG. BMW i3 naudojamas celės stebėjimo IG taip pat komunikuoja SPI protokolu. Tačiau gamintojas nusprendė standartizuoti komunikacijos protokolus ir naudojant mikrovaldiklį SPI komunikaciją pakeisti į CAN protokolą.

1.2.2. Baterijų bloko celių balansavimo metodai

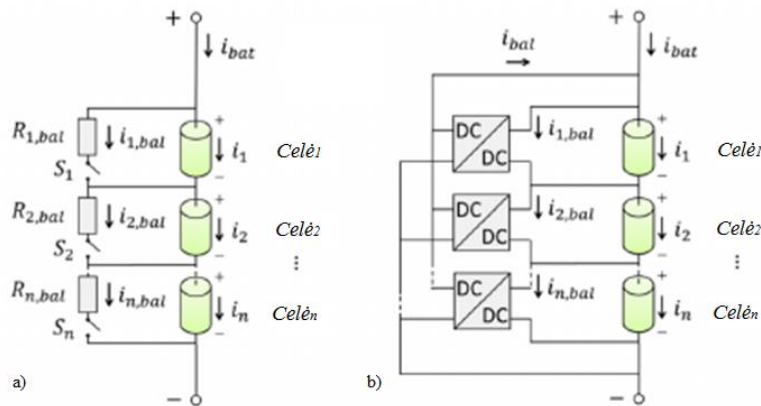
Baterijų bloko balansavimas taikomas norint maksimaliai išnaudoti baterijų talpą ir pratęsti baterijų tarnavimo laiką. Baterijų blokas, kuris neturi balansavimo funkcijos po tam tikro įkrovimo ir iškrovimo ciklų skaičiaus gali tapti labai neefektyvus, dėl celių įtampos išsibarstymo. Dažniausiai disbalansas pasireiškia dėl skirtingų celių nuotėkio srovių, kurios atsiranda dėl celių senėjimo, neigiamos ar didesnės nei leidžiama eksploatavimo temperatūros, 1C ir didesnių ilgalaikių iškrovos srovių. Neatliekant priverstinio balansavimo krovimas vykdomas pagal didžiausią įtampą turinčios celės talpą, o iškrovimas pagal žemiausią įtampą turinčią celę. Efektyvus SOC langas gali tapti labai mažas.

Baterijų įkrovimo metu celės turi skirtingą SOC lygį ir yra sujungtos nuosekliai. Tai veda prie skirtingų įkrovimo laikų, didžiausią SOC lygį krovimo pradžioje turėjusios celės pasikraus greičiausiai ir atvirksčiai. Norint visas celes pakrauti iki tokio pačio SOC lygio, aukštesnį potencialą turinčias celes reikia iškrauti (pasyvus balansavimas), arba perduoti žemesnį potencialą turinčioms celėms (aktyvus balansavimas). Straipsnyje [12] atliktas aktyvaus ir pasyvaus balansavimo palyginimas dideliame baterijų bloke, kuris sudarytas iš celių turinčių skirtingas SOC vertes. Rezultatai rodo, kad aktyvus balansavimas labiau padidina bloko ilgaamžiškumą, tačiau skirtumas yra minimalus ir abu balansavimo būdai dideliuose baterijų blokuose yra pakankami. 1.2.2.1 paveikslėlyje pateikti talpos kitimo rezultatai naudojant skirtingus balansavimo metodus 15 mėnesių laikotarpyje. X ašis-laikas, Y ašis-talpa, violetinės spalvos kryželiai- aktyvus balansavimas išmatuoti duomenys, mėlynos spalvos kryželiai- pasyvus balansavimas išmatuoti duomenys, punktyrinės linijos-atitinkamai modeliavimo duomenys pagal celių senėjimo lygtis.



1.2.2.1 pav. Aktyvaus ir pasyvaus balansavimo palyginimas [12].

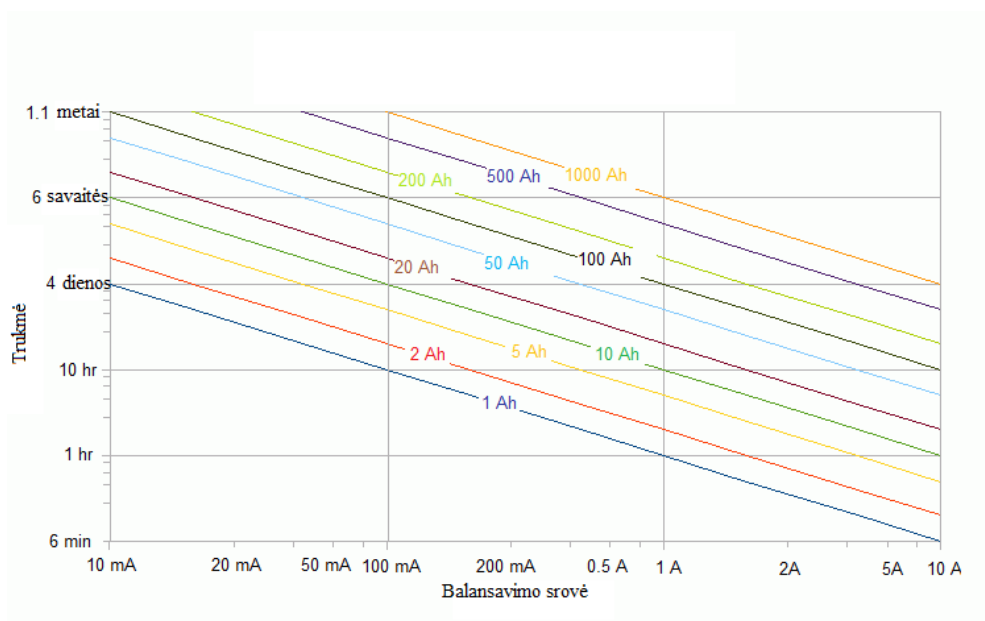
Pasyvus balansavimas baterijos įkrovimo metu perteklinę celės energiją šuntuoja per apkrovos rezistorių ir paverčia šiluma. Kadangi toks balansavimo būdas nėra efektyvus jis taikomas didelėms baterijų blokams, kur į šilumą išvaistytas energijos kiekis sudarytų santykinai mažą vertę palyginus su bendru celės energijos kiekiu. Aktyvus balansavimas dažniausiai taikomas mažiems baterijų blokams. Sudėtingas ir brangus aktyvaus balansavimo grandinės realizavimas, yra ekonomiškai neefektyvus elektromobilių baterijų blokuose, kur didelis celių skaičius. 1.2.2.2 paveikslėlyje pateiktas a) pasyvaus ir b) aktyvaus celių balansavimo struktūros pavyzdys.



1.2.2.2 pav. a) Aktyvus, b) pasyvus celių balansavimas [13].

Pasyvus baterijų bloko balansavimas priklausomai nuo jo talpos ir balansavimo srovės gali užtrukti nuo kelių minučių iki metų (1.2.2.3 paveikslėlis) [14]. Apytikslė balansavimo trukmė pagal nutylėjimą surandama 3 formule:

$$\text{balansavimo trukmė (h)} = \frac{\text{Baterijos talpa [Ah]}}{\text{Balansavimo srovė [A]}} \quad (3)$$

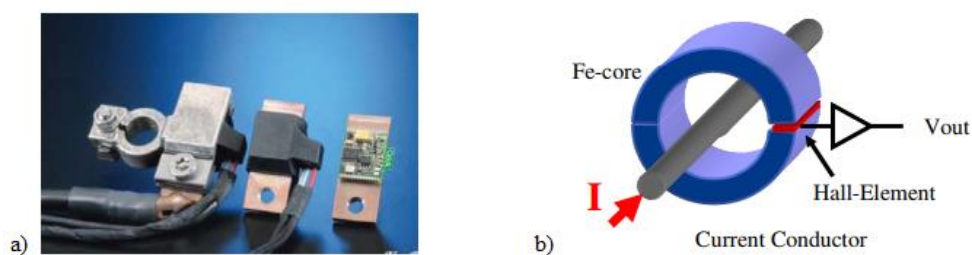


1.2.2.3 pav. Pasyvus celių balansavimas [16].

Dažniausiai celių balansavimas atliekamas tik kai prie elektromobilio prijungtas įkrovimo kabelis ir nevyksta krovimas, tuomet siekiant kompensuoti paros celės nuotėkio srovės poveikį tenka didinti balansavimo srovę.

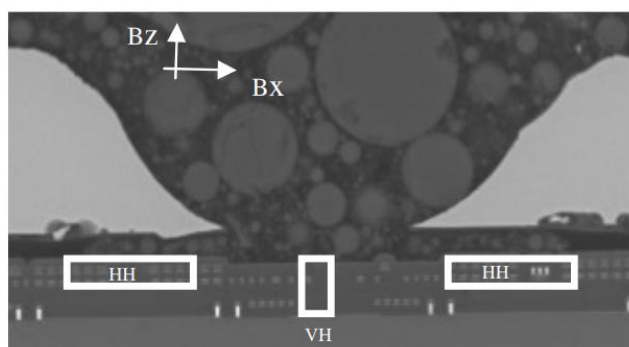
1.2.3. Srovės matavimo metodai

Baterijų bloko srovės matavimas yra svarbus tiek duomenų kaupimui ir atvaizdavimui apie esamą bloko įkrovos lygį, tiek kaip apsaugos funkcija. Srovės matavimas taip pat svarbus celių balansavimo metu, baterijų įkrovimo srovė turi būti artima balansavimo srovei. Tuo pačiu sensoriumi išmatuoti srovės nuo $\pm xx$ mA iki $\pm xxx$ A yra labai sudėtinga. Aukštos įtampos baterijų bloko srovės matavimo jutiklis taip pat turi būti galvaniskai izoliuotas žemos įtampos sistemos atžvilgiu. Srovės matavimas šuntu yra labai sudėtingas, nes ypač mažoms srovėms naudojamas didelės varžos šunto rezistorius, kuris tekant didesnėms srovėms kels šiluminius nuostolius ir gal perkaisti. 1.2.3.1 paveikslėlyje pateikiamas anksčiau minėtas sensorių vaizdas.



1.2.3.1 pav. a) Srovės matavimo šuntas, b) holo jutiklis. [15].

Norint pamatuoti srovę nuo ± 30 mA iki ± 1000 A reikalingas sensorius su 30 000 dinaminio diapazonu. Tradiciniai holo efektu veikiantys srovės jutikliai su feritine šerdimi tokio dinaminio diapazono nesuteikia, dėl greito magnetinės šerdies įsisotinimo. Tokio sensoriaus dinaminis diapazonas neviršija 500. Didesnio jautrumo holo efekto srovės sensoriuose naudojami hibridiniai holo jutikliai, kurie viename sensoriuje talpina keletą skirtingo jautrumo sensorių. Tekant žemoms srovėms veikia jautresnis holo jutiklis, kuris augant srovei įsisotina ir pradeda veikti mažiau jautrus holo sensorius. 1.2.3.2 peikslėlyje hibridinio srovės sensoriaus kristalo vaizdas.



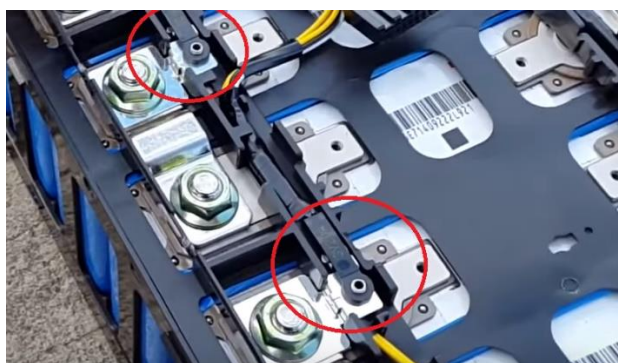
1.2.3.2 pav. Hibridinis srovės matavimo holo jutiklis [17].

Dvigubas horizontalus (HH) holo jutiklis leidžia tiksliau pamatuoti žemas sroves iki dešimčių amperų, tuo tarpu vertikalus (VH) holo jutiklis yra mažiau jautrus ir leidžia matuoti sroves iki šimtų amperų. Hibridiniai srovės sensoriai elektromobilių baterijų blokuose palengvina srovės matavimo procesą, dėl galimybės naudoti vieną srovės sensorių, kuris yra tiek galvaniskai izoliuotas, tiek pasižymi artimu srovės šuntams dinamiu diapazonu.

1.2.4. Temperatūros matavimo metodai

Baterijų temperatūros matavimas yra tiek pat svarbus, kiek ir įtampos matavimas. Baterijų eksploatavimo svarbu naudoti baterijų gamintojo rekomenduojamą temperatūrinį langą. Taip pat reikia atkreipti dėmesį į pačios celės sugeneruojamą šilumos kiekį esant maksimalioms galimoms iškrovos srovėms.

Celės vidinė temperatūra iškrovimo metu yra visuomet didesnė nei išorinio apvalkalo, tačiau pamatuoti temperatūrą celės viduje yra labai sudėtinga dėl baterijos vidinės struktūros. Tyrimų rezultatai [16] rodo, kad celės temperatūra iškrovimo metu yra didžiausia teigiamo gnybto vietoje, tuo pačiu labiausiai atspindi vidinės celės temperatūros vertę. 1.2.4.1 paveikslėlyje pateiktas Mitsubishi Outlander baterijų bloko celių temperatūros matavimo būdas teigiamo poliaus vietoje, temperatūros jutikliai apibraukti raudonu apskritimu.



1.2.4.1 pav. Temperatūros matavimas šalia teigiamo poliaus. [17].

Ličio jonų ir ličio polimerų tipo baterijos šiluminiais poveikiais yra mažiau atsparios dėl cheminės sudėties savybių [18]. Pasiekus 80 °C ar didesnę temperatūrą gali prasidėti nebeutrūkstamys temperatūriniai procesai, kurie veda prie savaiminio celės susinaikinimo arba užsidegimo. Ličio geležies fosfato celės yra atsparesnės, dėl kitokių ličio junginių naudojimo baterijos viduje. Pasiekus kritinę celės temperatūrą gaisro rizika yra minimali, baterijos tiesiog praranda savo elektrines savybes ir smarkiai degraduoja.

Temperatūros matavimo taškų skaičius apsprendžiamas baterijų bloko monitoringo sistemos galimybėmis. Norint pamatuoti visų bloke esančių celių temperatūras reikalingas didelis kiekis analoginių arba skaitmeninių temperatūros nuskaitymo įėjimų. Temperatūros matavimo grandinės

turi būti galvaniškai izoliuotos nuo baterijų bloko įtampos. Izoliavimas atliekamas naudojant kompozitinius kompaundais dengtus temperatūros jutiklius. Dažniausiai sutinkami NTC 10 k Ω termorezistoriai.

1.2.4.2 paveikslėlyje pateikiami įvairūs baterijų blokuose naudojami termorezistoriai:

1- plokščias gretimų celių paviršiaus temperatūros matavimo jutiklis; 2- celės gnybto temperatūros matavimo jutiklis; 3- celės paviršiaus temperatūros matavimo jutiklis; 4- lankstus temperatūros matavimo jutiklis; 5- celių aušinimo skysčio temperatūros matavimo jutiklis; 6- celių aušinimo skysčio magistralės temperatūros matavimo jutiklis.



1.2.4.2 pav. Temperatūros matavimas jutikliai[19].

Remiantis anksčiau minėta informacija apie baterijų temperatūros stebėjimą, elektromobilių blokuose dažniausiai sutinkami 2 tipo jutikliai, kurie montuojami tiesiogiai prie baterijų galios kontaktų.

1.2.5. Izoliacijos varžos įvertinimo metodas

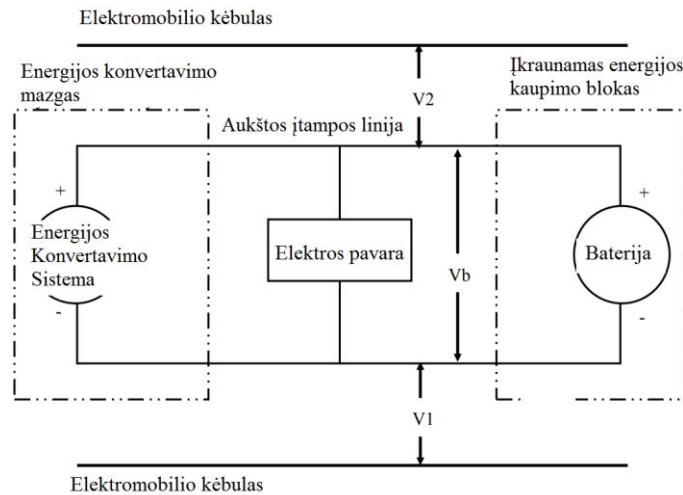
Izoliacijos varžos įvertinimo metodai aprašomi remiantis elektromobilių saugos reikalavimų Nr. 99, 100 taisykle [20]. Elektros galios grandinė sudaryta iš atskirų nuolatinės arba kintamos srovės grandinių. Jei kintamos ir nuolatinės srovės galios grandinės yra galvaniškai atrištos viena nuo kitos, izoliacijos varža tarp aukštos įtampos linijų ir kėbulo, nuolatinės srovės atveju 100 Ω/V . Kintamos srovės linijos izoliacijos varža 500 Ω/V elektromobilio kėbulo atžvilgiu.

Galvaniškai susietoms kintamos ir nuolatinės srovės grandinėms privaloma 500 Ω/V izoliacijos varža elektromobilio kėbulo atžvilgiu. Tačiau jei kintamos srovės grandinės atitinka, bent vieną iš žemiau nurodytų punktų galima izoliacijos varža 100 Ω/V elektromobilio kėbulo atžvilgiu.

- Du ir daugiau sluoksnių gryno laidininko izoliatoriaus, pertvaros ir korpusai nėra prieinami/atidaromi, aptarnaujami tik specialistų ir tik specialiais įrankiais. Keleivių zonoje aukštos įtampos galios grandinės turi tenkinti IPXXD apsaugos laipsnį. Kituose vietose išskyrus bagažo zonas privalomas IPXXB apsaugos laipsnio tenkinimas

- Mechanškai atsparios dangos/korpusai užtikrinančios pakankamą apsaugą visą elektromobilio eksploataavimo laikotarpį.

Matavimo metodas pateiktas 1.2.5.1 paveikslėlyje, įtampos matavimo prietaiso vidinė varža $>10M\Omega$. Metodui atlikti naudojamas vidinis energijos šaltinis, šiuo atveju elektromobilio baterijų blokas.

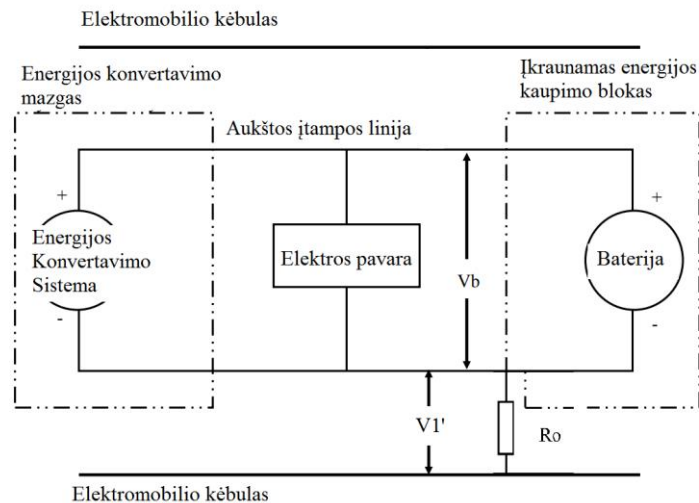


1.2.5.1 pav. Izoliacijos varžos matavimo struktūrinė schema 1 [20].

Matavimas atliekamas žingsniais:

- Matuojama baterijų bloko įtampa V_b .
- Matuojama įtampa V_1 tarp neigiamos baterijų bloko linijos ir elektromobilio kėbulo.
- Matuojama įtampa V_2 tarp teigiamos baterijų bloko linijos ir elektromobilio kėbulo.
- Jei V_1 yra lygi arba didesnė už V_2 , žinomo nominalo varža R_o yra prijungiama prie neigiamos baterijos įtampos linijos ir kėbulo (1.2.5.2 paveikslėlis). Esant pajungtai R_o varžai dar kartą matuojama V_1' įtampa. Izoliacijos varža $R_i \Omega$ surandama pagal 5 formulę:

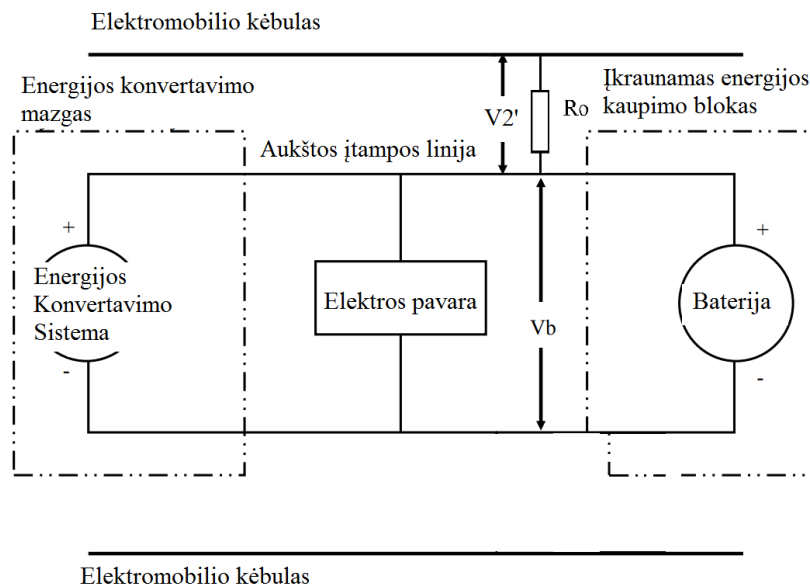
$$R_i = R_o * V_b \left(\frac{1}{V_1'} - \frac{1}{V_1} \right) \quad (5)$$



1.2.5.2 pav. Izoliacijos varžos matavimo struktūrinė schema 2 [20].

Jei V_2 įtampa yra didesnė už V_1 įtampą žinomo nominalo varža R_o yra prijungiama prie teigiamos baterijos įtampos linijos ir kėbulo (1.2.5.3 paveikslėlis). Esant pajungtai R_o varžai dar kartą matuojama V_2' įtampa. Izoliacijos varža $R_i \Omega$ surandama pagal 6 formulę:

$$R_i = R_o * V_b \left(\frac{1}{V_2'} - \frac{1}{V_2} \right) \quad (6)$$



1.2.5.3 pav. Izoliacijos varžos matavimo struktūrinė schema 3 [20].

Elektrinės izoliacijos varža R_i padalinama iš nuolatinės srovės aukštos įtampos linijos darbinės įtampos vertės, gauti rezultatai pateikiami Ω/V pavidalu.

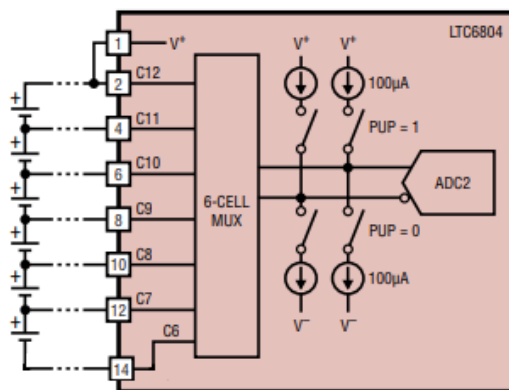
1.2.6. Baterijų bloko celių įtampų matavimas

Baterijų bloko individualių celių įtampos matavimas yra labai svarbus procesas užtikrinantis sklandų ir saugų sistemos veikimą. Baterijų cheminė sudėtis apsprendžia matuojamos įtampos ribas. Atitinkamai pagal elektrodo medžiagą:

- LiFePO_4 (Ličio Geležies Fosfato) kinta nuo 2.5 V iki 3.6 V normaliomis sąlygomis, kai baterija nėra perkaunama ar visiškai iškraunama.
- Li-Ion (Ličio Jonų) kinta nuo 2.5 V iki 4.2 V normaliomis sąlygomis, kai baterija nėra perkaunama ar visiškai iškraunama.
- Li-Po (Ličio Polimerų) kinta nuo 2.5 V iki 4.2 V normaliomis sąlygomis, kai baterija nėra perkaunama ar visiškai iškraunama.

Galimi įvairūs įtampos matavimo būdai, tačiau reikia nepamiršti, kad matavimo metu turi būti sunaudojama kiek įmanoma mažiau energijos iš matuojamos celės. Kitu atveju galimas greitas baterijų savaiminis išsikrovimas. Baterijų bloką priklausomai nuo reikalingos įtampos sudaro nemažas celių skaičius, kuris dažniausiai siekia iki 100 vnt. Kiekvienos celės įtampos matavimui

naudoti atskirus analogas kodas keitiklius būtų sudėtinga ir neekonomiška, todėl naudojami multiplexoriai, kurie aptarnauja 6-12 celių su vienu (AK) analogas kodas keitikliu[21]. Įtampos nuskaitymas AK keitikliu užtrunka tam tikrą laiko dalį, todėl norint tiksliai pamatuoti įtampą, ar suskaičiuoti jos vidurkį, reikia įvertinti AK keitiklio konversijos trukmę. 1.2.6.1 paveikslėlyje pateiktas 6 celių įtampos matavimo pavyzdys su vienu AK keitikliu. Papildomi srovės šaltiniai skirti aptikti nutrūkusiam kontaktui tarp baterijos ir įtampos matavimo grandinės.



1.2.6.1 pav. Celių įtampos matavimo grandinės struktūra [21].

Baterijų bloko įtampos matavimui pritaikyti IG pasižymi ypač dideliu ir tikslumu, todėl retu atveju vietoje specializuotų IG naudojami mikrovaldikliai su papildomomis signalo apdorojimo grandinėmis kaip varžiniai dalikliai.

Elektromobilio baterijų bloke sutinkama ne viena komunikacijos protokolo rūšis.

1.3. Saugumo reikalavimai baterijoms ir valdymo grandinėms

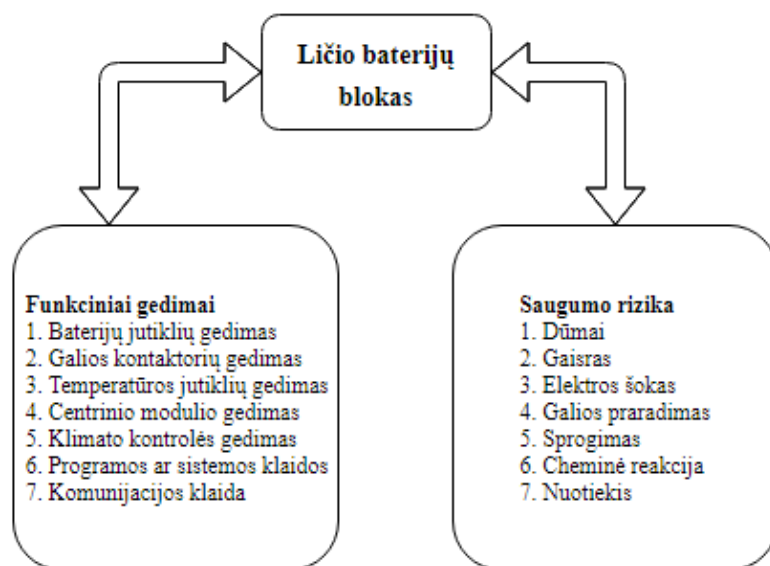
ISO 26262 standartas nurodo reikalavimus ir rekomendacijas, kurios padeda pasiekti saugią baterijų bloko eksploataciją ir funkcionavimą: sistemos kūrimo; realizavimo; gamybos; eksploataavimo ir servizo etapuose [22]. Taip pat nusako galimas grėsmes sukeltas sistemos defektų atsiradimo elektrinėse grandinėse ir komunikacijos linijose metu. Reikalavimai taikomi keleiviniams pakraunamiems elektromobiliams su aukštos įtampos baterijų blokais.

Prototipo stadijoje svarbu apibrėžti sistemoje naudojamų elementų savybes, kurios susijusios su sklandžiu sistemos veikimu ir galimomis grėsmėmis atsiradusioms sugedus konkreitiems elementams[23].

Baterijų bloke nuosekliai sujungiamos Ličio baterijos, kuriuose kaupiama energija elektrinės pavaros maitinimui. Galios kontaktoriai sujungia ir atjungia baterijų bloką, su elektrinės pavaros valdikliu ar baterijų įkrovimo sistema. Srovės sensorius matuoja baterijų bloko ištekančios ir įtekančios srovės vertes. Informacija siunčiama į baterijų valdymo bloką. Baterijų valdymo blokas stebi visų celių įtampas, temperatūras, srovę. Informacija perduodama į pagrindinį sistemos

kompiuterį. Pagrindinis servizo atjungėjas suteikia galimybę saugiai atjungti baterijų bloką nuo visos sistemos.

Atliekant pavojaus analizę ir rizikos vertinimą (*angl. HARA Hazard Analysis and Risk Assessment*) atsižvelgiama į sistemos struktūrą (1.3.1 paveikslėlis)[23].



1.3.1 pav. Gedimai ir rizikos [23].

Galimos įvairios gedimų kombinacijos, priklausomai nuo sugedusio mazgo svarbos lygio, sistema privalo vykdyti atitinkamus procesus. 1.3.1 lentelėje pateikiamos gedimo aptikimo strategijos.

1.3.1 lentelė. Gedimo aptikimo strategijos.

| Sistema/komponentas | Aptiktas gedimas | Testavimo procesas saugiam gedimui indikuoti | Priimtinas kriterijus |
|--------------------------|---|--|---|
| BMS sistema | 1. Atviras kontaktas, trumpas jungimas, nepastovus kontaktas BMS sistemos aparatinis gedimas | 1. Visi įmanomi įėjimai turi kontaktą su žeme 2. BMS valdiklio neatpažįstamos logikos simuliacija 3. Netinkamų signalų simuliacija BMS valdikliui. | Aktyvuojamas avarinis režimas. Generuojamas programinis / aparatinis avarinis išjungimas |
| Kontakoriai ir saugiklis | 1. Kontaktoriaus trumpas jungimas 2. Sudegęs saugiklis | 1. Susivirinusio kontaktoriaus gnybtų simuliacija 2. Saugiklio sudeginimas baterijų bloke | Aparatinis avarinis atjungimas. Saugiklio suveikimas remiantis saugiklio specifikacijomis |
| Temperatūros jutikliai | Temperatūros jutiklio klaida | 1. $\pm 20\%$ temperatūros nuokrypis nuo realios vertės. Jutiklio defektas, senėjimas, trumpas jungimas, atviras kontaktas. | Sistema turi indikuoti jutiklio gedimą. Aktyvuojamas avarinis režimas |
| Baterijos | Baterijos celės trumpas jungimas. Celės savaiminis išsikrovimas | 1. Išsikrovus vienai celei stebimas poveikis visoms celėms, baterijų blokui | Aktyvuojamas avarinis režimas |

Avarinis išjungimas taip pat reikalingas esant šioms situacijoms:

- Aukštos įtampos kabelio atjungimas (*angl. HVIL – High Voltage Interlock*)

- Viršytas iškrovimo lygis
- Viršytas įkrovimo lygis;
- Viršyta minkšto sujungimo galia;
- Kontaktorių gedimas;
- Nepatikta celės įtampa;
- 12V akumuliatoriaus lygis per žemas;
- Celės įtampa viršija ribas;
- Celės temperatūra viršija ribas;
- Dingusi komunikacija su BMS valdikliu.

Taip pat baterijų blokams atliekami trumpo jungimo, deformavimo, panardinimo į vandenį, gaisro, perkrovimo, temperatūrinio šoko bandymai. Visiems atviriems baterijų bloko kontaktams atliekamas IP2x piršto formos prisilietimo probos testas. Aukštos įtampos pramušimo testas elektriniams galios kontaktams.

1.4. Apibendrinimai

Išnagrinėjus mokslinę literatūrą apie baterijų bloko valdymą ir jiems keliamus reikalavimus pastebėta tendencingų sprendimų skirtų užtikrinti saugiam baterijų bloko veikimui. Tuo pačiu pastebėta ir trūkumų, moksliniuose šaltiniuose retai minimas baterijų bloko nuotėkio srovės matavimas, kuris yra privalomas remiantis elektromobilių saugos reikalavimų nr.99, 100 taisykle [22]. Elektronikos komponentų gamintojai siūlo įvairių baterijų bloko celių stebėsenos ir balansavimo IG, kurie tarpusavyje pakankamai panašūs.

Apžvelgus literatūrinę medžiagą galima konkretizuoti kaip turėtų atrodyti baterijų bloko valdymo sistema ir kokias funkcijas ji turėtų turėti.

1. Celės minimalios ir maksimalios įtampos nustatymas, (matavimas 1-5 V);
2. Celės minimalios ir maksimalios temperatūros nustatymas, (matavimas -50 °C iki 150 °C);
3. Baterijų bloko celių balansavimas;
4. Baterijų bloko srovės matavimas $\leq \pm 1$ A iki ± 500 A;
5. Izoliacijos varžos matavimas;
6. Galios kontaktorių valdymas;
7. Avarinis baterijų bloko stabdymas.

Atsižvelgiant į aukščiau pateiktus reikalavimus bus atliekamas baterijų bloko modeliavimas, valdymo grandinių projektavimas ir tyrimas.

2. PROJEKTINĖ DALIS

Baterijų blokas viena iš brangiausių elektromobilio dalių. Atliekant įvairius bandymus su baterijų bloko galima jį gana lengvai sugadinti, tiek perkrovus, tiek per daug iškrovus. Tam tikslui atliekami teoriniai modeliavimai, kurie padės įvertinti baterijų bloko celių veikimą esant įvairioms iškrovos srovės vertėms, aplinkos sąlygoms.

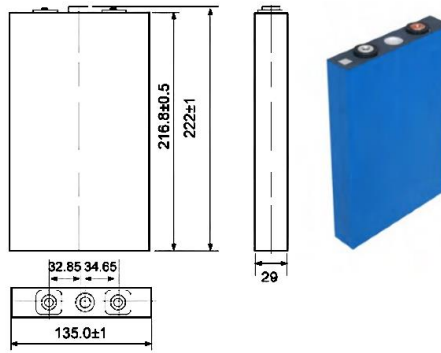
Remiantis gautas modeliavimo duomenimis bus atliekamas baterijų bloko valdymo grandinių projektavimas. Suprojektuotos grandinės bus panaudotos eksperimentinių tyrimų vykdymui.

2.1. Baterijų bloko modeliavimas

Teorinis baterijų bloko modelis projektuojamas pagal realų baterijų bloką naudojamą UAB „Elinta Motors“ gaminamuose hibridiniuose elektromobiliuose, kurį sudaro 84 vnt. CALB L135F72 [24] celių.

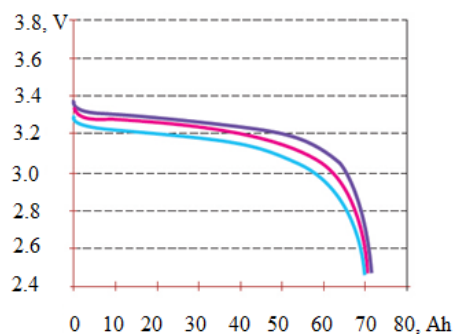
- Nominali talpa esant 0.3 C iškrovai 72 Ah;
- Maksimali krovimo srovė 72 A;
- Maksimali pastovi iškrovimo srovė 216 A;
- Nominali įtampa 3.2 V;
- Maksimali iškrovimo įtampa 2.5 V;
- Naudotinas SOC langas 10 % ~ 90 %;
- Impedansas esant 1 kHz AC $\leq 0.6 \text{ m}\Omega$;
- Esant 0.3 C iškrovai po 2000 iškrovimo ciklų lieka 80 % nominalios talpos;
- Krovimo temperatūra 0 °C ~ 45 °C;
- Iškrovimo temperatūra -20 °C ~ 55 °C;
- Energijos tankis 121Wh/Kg;
- Savaiminis išsikrovimas (25 °C, 1 mėn.) $\leq 5\%$.

2.1.1 paveikslėlyje pateikiamas CALB L135F72 celių vaizdas.



2.1.1 pav. CALB L135F72 celės matmenys [24].

Modeliavimui naudojami duomenys gauti skaitmenizuojant baterijų gamintojo aprašyme pateiktą celės iškrovimo charakteristiką (2.1.2 paveikslėlis) [24]. Kreivės taškų skaitmenizavimui panaudotas „ScanIt“ įrankis [25].



2.1.2 pav. CALB L135F72 celės iškrovimo profilis 21.6 A, 36 A, 72 A iškrovimo srovėmis.

2.1.1. Baterijų bloko modelio sudarymas baterijų senėjimo tyrimui

Duomenimis iš anksčiau minėtų gamintojo specifikacijų aprašomas vienos celės Simulink baterijos modelis. Suvesti duomenys pateikiami lentelių pavidalu žemiau: 2.1.1.1- 2.1.1.3 lentelės. Siekiant sukurti visą baterijų bloko masyvą celės įtampa, vidinė varža padidinama 84 kartus atitinkamai baterijų bloko įtampai ir varžai. Modeliavimo metu neįvertinami baterijų galios gnybtų įvedami rezistyvieniai nuostoliai.

2.1.1.1 lentelė. Bendri baterijos parametrai modeliui aprašyti

| Iškrovimas | Vertės |
|-----------------------------|---------------------|
| Max. talpa | 72 Ah |
| Minimali įtampa | 2.5*84 V |
| Pilnai įkrauta | 3.4*84 V |
| Nominali iškrovimo srovė | 72*0.3 A |
| Vidinė varža | 5mΩ *84 |
| Talpa ties nominalia įtampa | 50 Ah |
| Ekspozicinė zona | [3.32*84 V 3.13 Ah] |

2.1.1.2 lentelė. Temperatūriniai celės parametrai.

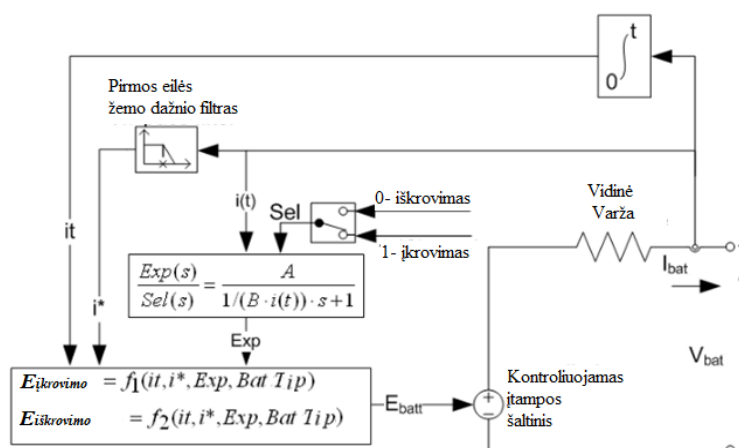
| Temperatūra | Vertės |
|----------------------------|--------|
| Celės temp. | 25 °C |
| Nominali aplinkos temp. T1 | 25 °C |

| | |
|----------------------------|-------------------|
| Nominali aplinkos temp. T2 | 0 °C |
| Max. Talpa | 66.4 Ah |
| Pradinė iškrovimo įtampa | 3.4*84 V |
| Įtampa prie 90 % iškrovos | 2.5*84 V |
| Eksponentinė zona | [3.2*84 V 2.8 Ah] |

2.1.1.3 lentelė. Temperatūriniai celės nuostoliai ir reakcija.

| | |
|---|---------------|
| Termo nuostoliai ir reakcija | Vertės |
| Celė į aplinką | 0.6 °C/W |
| Laiko pastovioji: celė-aplinka | 4880 s |
| Senėjimas | Vertės |
| Talpa gyvenimo pabaigoje | 72*0.8 Ah |
| Vidinė varža gyvenimo pabaigoje | 10mΩ *84 |
| Įkrovimo srovė [Ic Icmx] | [21.6 A 72 A] |
| Iškrovimo srovė [Id Idmax] | [72 A 216 A] |
| Trukmė esant 100 % DOD Ic ir Id ciklai | 1500 |
| Trukmė esant 25 % DOD Ic ir Id ciklai | 6000 |
| Trukmė esant 100 % DOD Ic ir Idmax ciklai | 1000 |
| Trukmė esant 25 % DOD Icmx ir Id ciklai | 1400 |

Bateriją sudaro teorinis modelis sudarytas iš kontroliuojamo įtampos šaltinio su nuosekliai prijungta vidine varža pateiktas 2.1.1.1 paveikslėlyje.



2.1.1.1pav. Teorinis baterijos modelis.[26]

Ličio jonų cheminės sudėties baterijoms taikomi įkrovimo (7 formulė) ir iškrovimo (8 formulė) matematiniai modeliai pateikti žemiau.

Iškrovimas, kai $i^* > 0$:

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \times \frac{Q}{Q-it} \times i^* - K \times \frac{Q}{Q-it} \times it + A \times \exp(-B \times it) \quad (7)$$

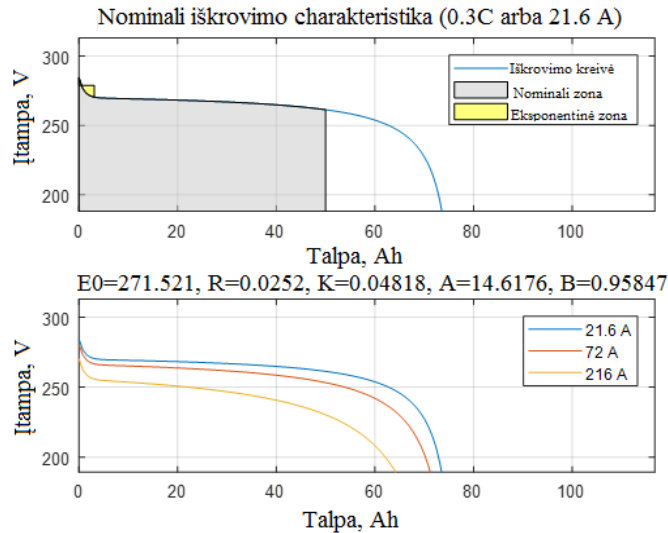
Įkrovimas, kai $i^* < 0$:

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \times \frac{Q}{|it|+0.1 \times Q} \times i^* - K \times \frac{Q}{Q-it} \times it + A \times \exp(-B \times it) \quad (8)$$

E_{Bat} - netiesinė įtampa, V; E_0 - pastovi įtampa, V; $Exp(s)$ - eksponentinė zona, V; K - poliarizacijos konstanta, Ah^{-1} , arba poliarizacijos varža, Ω ; i^* - žemo dažnio srovės dedamoji,

A ; i - baterijos srovė, A; it - išgauta talpa, Ah; Q - maksimali talpa, Ah; A - eksponentinė įtampa, V; B - eksponentinė talpa, Ah^{-1} .

Remiantis duomenimis pateiktas aukščiau nubraižomas viso baterijų bloko sudaryto iš 84 nuosekliai sujungtų celių iškrovimo profilis. Pateiktas 2.1.1.2 paveikslėlyje. Simuliacijos metu naudota 25 °C aplinkos temperatūra.



2.1.1.2 pav. Sumodeliuotas CALB L135F72 84 celių iškrovimo profilis.

Palyginus gautas baterijų iškrovimo kreives su gamintojo pateikiamomis nepastebėta skirtumų. Todėl galima teigti, jog ceļ aprašantys modeliavimo duomenys pateikti teisingai ir yra tinkami tolimesniam baterijų bloko modeliavimui. Senėjimo modeliui aprašomos temperatūros poveikio lygtys iškrovimo metu (9) ir įkrovimo metu (10). Taip pat aprašomos baterijos įtampos lygtys iškrovimo metu (11) ir įkrovimo metu (12).

Iškrovimas, kai $i^* > 0$:

$$f_1(it, i^*, i, T, T_a) = E_0(T) - K(T) \times \frac{Q(T_a)}{Q(T_a) - it} \times i^* - K \times \frac{Q}{Q - it} \times it + A \times \exp(-B \times it) - C \times it \quad (9)$$

$$V_{batt}(T) = f_1(it, i^*, i, T, T_a) - R(T) \times i \quad (10)$$

Įkrovimas, kai $i^* < 0$:

$$f_1(it, i^*, i, T, T_a) = E_0(T) - K(T) \times \frac{Q(T_a)}{|it| + 0.1 \times Q(T_a)} \times i(T)^* - K \times \frac{Q}{Q - it} \times it + A \times \exp(-B \times it) - C \times it \quad (11)$$

$$V_{batt}(T) = f_1(it, i^*, i, T, T_a) - R(T) \times i \quad (12)$$

Norint apskaičiuoti aukščiau pateiktas lygtis taip pat reikia apskaičiuoti papildomas lygtis kurios pateiktos žemiau. 13 formulė - įtampos priklausomybė nuo temperatūros. 14 formulė - poliarizacijos priklausomybė nuo temperatūros. 15 formulė - talpos priklausomybė nuo temperatūros. 16 formulė- vidinės varžos priklausomybė nuo temperatūros.

$$E_0(T) = E_0|_{T_{ref}} + \frac{\partial E}{\partial T}(T - T_{ref}) \quad (13)$$

$$K(T) = K|_{T_{ref}} \times \exp\left(\alpha\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \quad (14)$$

$$Q(T_a) = Q|_{T_a} + \frac{\Delta Q}{\Delta T}(T - T_{ref}) \quad (15)$$

$$R(T) = R|_{T_{ref}} \times \exp\left(\beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \quad (16)$$

T_{ref} - nominali aplinkos temperatūra, K; T - celės temperatūra, K; T_a - aplinkos temperatūra, K; E/T - atgalinės įtampos temperatūrinis koef., V/K; α - Arenijaus rodiklio konstanta varžos poliarizacijai; β - Arenijaus rodiklio konstanta vidinei varžai; $\Delta Q/\Delta T$ - maksimalios talpos temperatūrinis koef., Ah/K; C - nominalus iškrovimo kreivės nuožulnumas, V/Ah.

Senėjimo efekto lygties sudarymas

Poveikis talpai aprašomas 17 formule.

$$Q(n) = \begin{cases} Q_{BOL} - \varepsilon(n)(Q_{BOL} - Q_{EOL}), & \text{jei } k/2 \neq 0 \\ Q(n-1), & \text{kitu atveju} \end{cases} \quad (17)$$

Poveikis vidinei varžai aprašomas 18 formule.

$$R(n) = \begin{cases} R_{BOL} - \varepsilon(n)(R_{BOL} - R_{EOL}), & \text{jei } k/2 \neq 0 \\ R(n-1), & \text{kitu atveju} \end{cases} \quad (18)$$

$$n = kT_h \quad (k = 1, 2, 3, \infty)$$

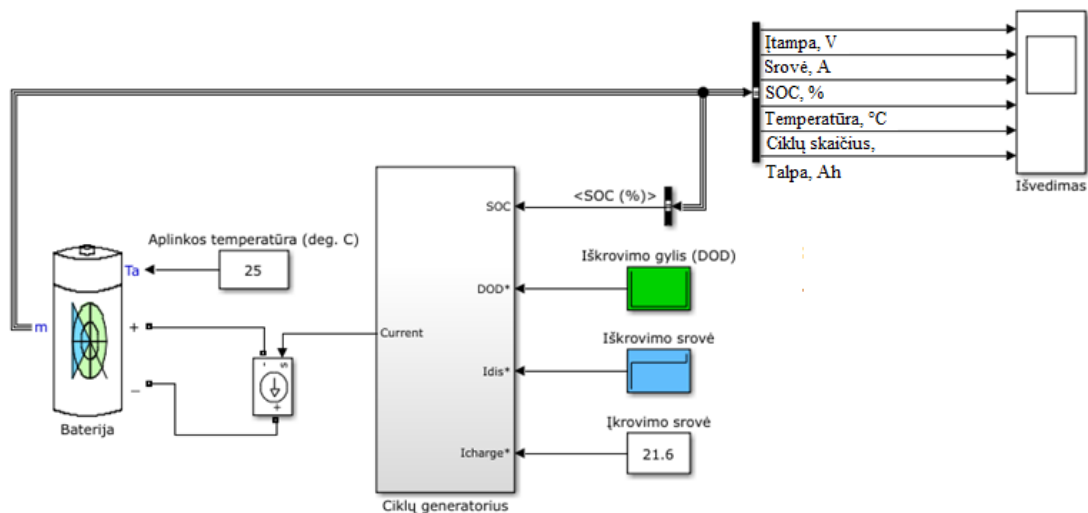
Baterijos senėjimo faktorius aprašomas 19 formule.

$$\varepsilon(n) = \begin{cases} \varepsilon(n-1) + \frac{0.5}{N(n-1)}\left(2 - \frac{DOD(n-2)+DOD(n)}{DOD(n-1)}\right), & \text{jei } k/2 \neq 0 \\ \varepsilon(n-1), & \text{kitu atveju} \end{cases} \quad (19)$$

DOD baterijos iškrovimo lygis nuo 0 iki 100 %, N – maksimalus ciklų skaičius surandamas pagal 20 formulę.

$$N(n) = H\left(\frac{DOD(n)}{100}\right)^{-\varepsilon} \times \exp\left(-\psi\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_a(n)}\right)\right) \times (I_{disavg}(n))^{-\gamma_1} \times (I_{chgavg}(n))^{-\gamma_2} \quad (20)$$

Pasinaudojant Simulink programinės įrangos bibliotekomis [27] sukuriama baterijos testavimo modelis, kurio stebimas baterijos įkrovimo ir iškrovimo lygis, atliktų ciklų skaičius, talpos nusidėvėjimas, darbinė įtampa bei srovė. Testavimo sistemą sudaro baterijos modelis su anksčiau aprašytais parametrais, vaizdas pateiktas 2.1.1.3 paveikslėlyje. Aplinkos temperatūros įvedimo langelis. Pastovios srovės programuojama apkrova. Iškrovimo gylio, srovės ir įkrovimo srovės langai.



268.8 V, 72 Ah, Lithium-Ion (LiFePO4) 1000h baterijos senėjimo simuliacijos

2.1.1.3 pav. Baterijų testavimo modelis.

Ciklų generatorių sudaro elementarus reguliatorius, kuris įkrovimo lygį nuo 0 % mažina iki 100 % atitinkamai reguliuoja iškrovimo lygį nuo 0 % iki 100 %. Pereinant iš krovimo į iškrovimo būseną įjungia pastovios srovės apkrovą arba įkrovimą.

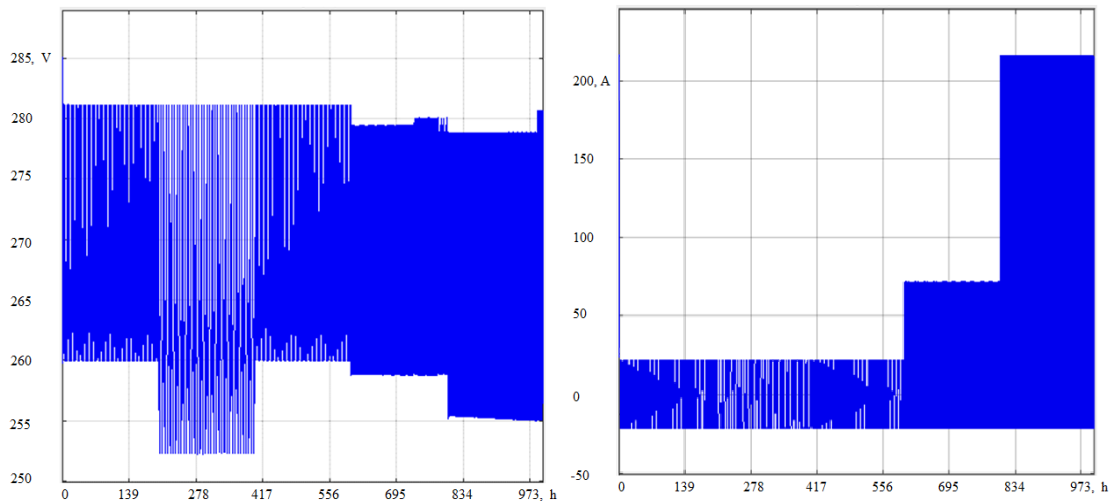
Naudojantis sukonfigūruota įkrovimo ir iškrovimo ciklų simuliacijos sistema bus bandoma atkurti įvairius eksploatacinius baterijų naudojimo scenarijus.

2.1.2. Teorinis baterijų bloko senėjimo tyrimas

Anksčiau pateiktu testavimo modeliu atliekamas baterijos senėjimo tyrimas. Sistemos testavimui sukuriama profilis. Testavimo trukmė 1000 valandų, aplinkos temperatūra 25°C. Įkrovimo srovė 21.6 A. Žemiau pateikiamas testavimo profilis :

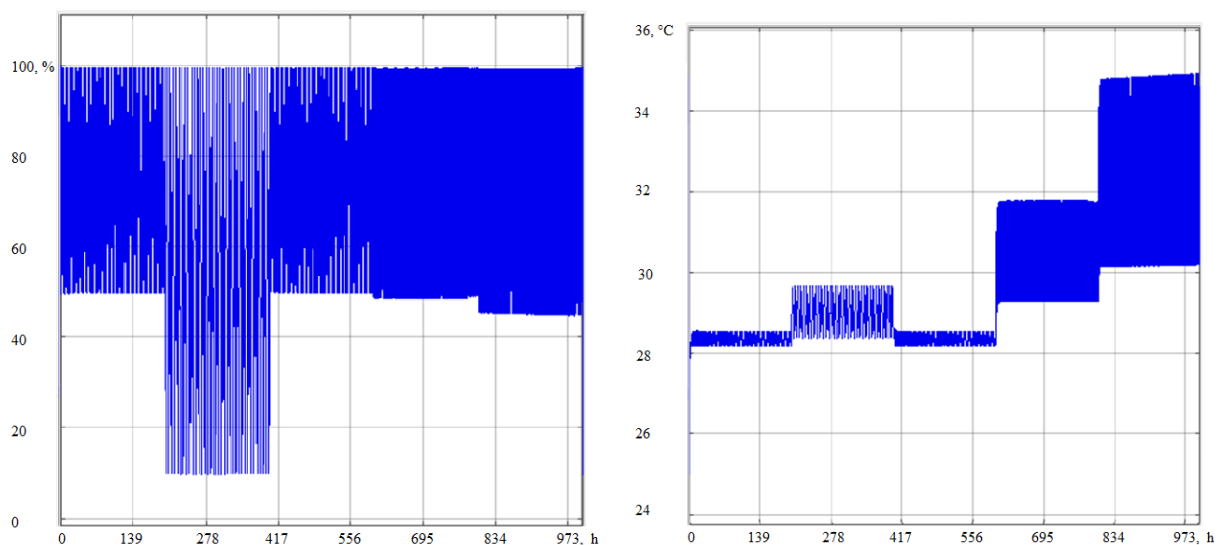
- Testo pradžia iškrovimo gylis 50 %, iškrovimo srovė 0.3 C (21.6 A), trukmė 200 h;
- Po 200 valandų iškrovimo gylis padidinamas iki 90 %, iškrovimo srovė 0.3 C (21.6 A), trukmė 200 h ;
- Po 400 valandų iškrovimo gylis sumažinamas iki 50 %, iškrovimo srovė 0.3 C (21.6 A), trukmė 200 h ;
- Po 600 valandų iškrovimo gylis 50 %, iškrovimo padidinama srovė 1 C (72 A), trukmė 200 h ;
- Po 800 valandų iškrovimo gylis 50 %, iškrovimo padidinama srovė 3 C (216 A), trukmė 200 h ;

Testavimo rezultatai pateikiami žemiau. 2.1.2.1 paveikslėlyje matomas įtampos ir srovės kitimo grafikas testavimo metu, esant 25°C aplinkos temperatūrai.



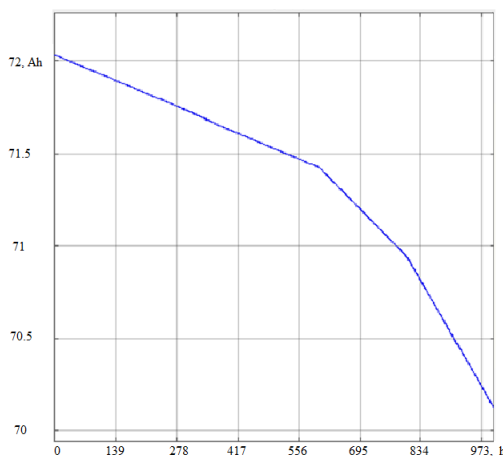
2.1.2.1 pav. Įtampos (nuo 253 iki 283 V) ir srovės (nuo -21.6A iki 216A) svyravimo vaizdas 25°C.

2.1.2.2 paveikslėlyje pateikiamas įkrovimo lygio grafikas (SOC, %), esant optimaliai baterijos apkrovai (<1C) įkrovos lygis spėja stabilizuotis ir yra pastovus ciklų metu, apkrovą padidinus iki maksimalios galimos sistema praranda balansą. Sistemos nuostoliai (varža ir šiluminiai nuostoliai, degradavimas) nebeleidžia įkrovos lygiui stabilizuotis dėl netolygaus įkrovimo ir iškrovimo energijos kiekio. Testavimo metu baterijų temperatūra nuolatos didėjo, tačiau išliko normos ribose, esant 25°C aplinkos temperatūrai. Didesnis temperatūros augimas pastebėtas dėl 3C srovės tekančios per baterijas, nei dėl SOC sumažinimo iki 10 %. Testavimo metu baterijų temperatūros vaizdas pateiktas 2.1.2.2 paveikslėlyje.



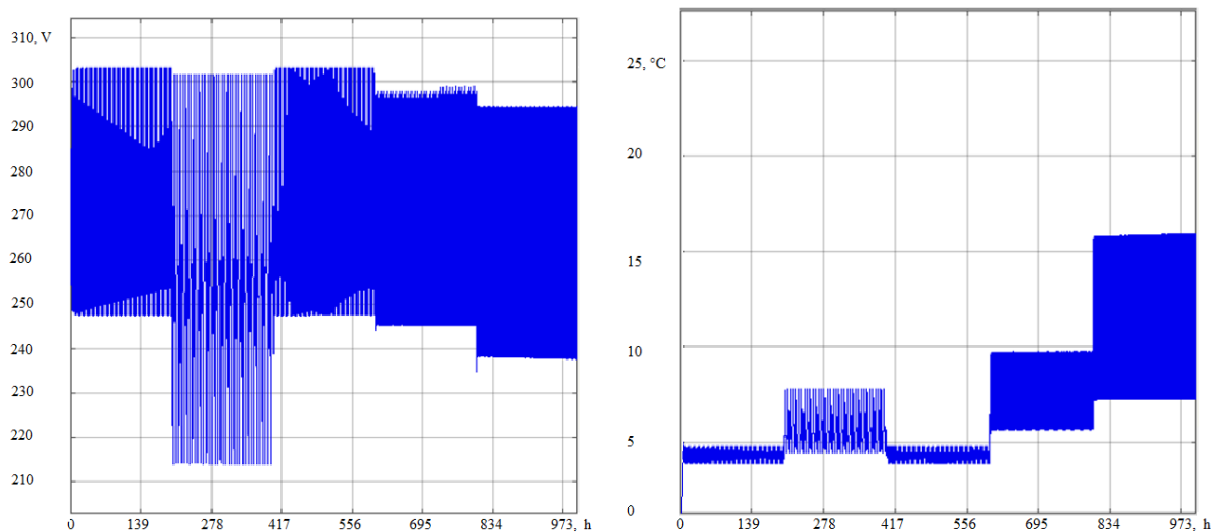
2.1.2.2 pav. Įkrovos lygio ir temperatūros vaizdas testavimo metu 25°C.

Testavimo metu per 1000 valandų atlikti beveik 200 įkrovimo ir iškrovimo ciklų. Baterijos talpa nukrito nuo 72 Ah iki 70.2 Ah, statistiškai prarado 2 % visos talpos (2.1.2.3 paveikslėlis).



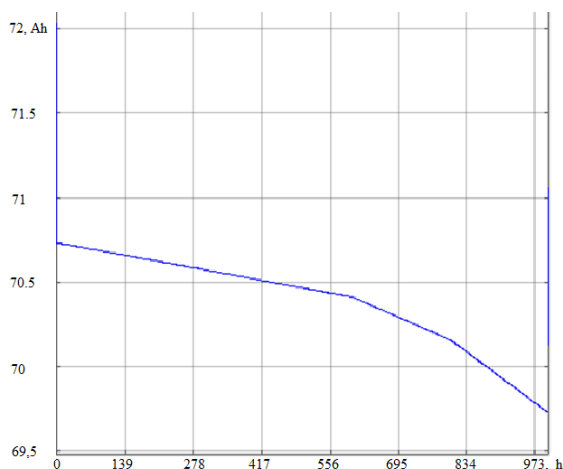
2.1.2.3 pav. Talpos sumažėjimo grafikas 25°C.

Analogiškas testas atliekamas prie 0 °C temperatūros, testavimo metu naudojamas anksčiau minėtas testavimo profilis. 12 paveikslėlyje pateiktas įtampos kitimo grafikas, matomas įtampos svyravimo padidėjimas, esant 10 % SOC vertei baterijos įtampa krenta iki 2.55V celei. Tokia įtampa yra labai artima minimaliai galimai. Pastebimas momentinis talpos sumažėjimas palyginus su 25 °C aplinkos temperatūros testu. Pradėjus testą jau po pirmo ciklo baterijų temperatūra pasiekia 4°C. Esant 3C iškrovai baterijos temperatūra nuo 7 °C pakilo iki 16 °C (2.1.2.4 paveikslėlis).



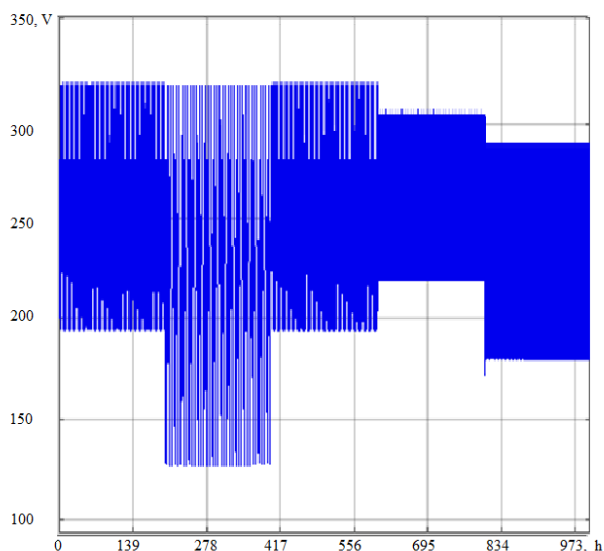
2.1.2.4 pav. Baterijų bloko įtampų grafikas 0°C.

Sumažėjus baterijų bloko talpai ir padidėjus vidinei varžai dėl žemos temperatūros testavimo metu įvykdyti 117 ciklų. Žema aplinkos temperatūra (0 °C) sukėlė momentinį talpos praradimą (2.1.2.5 paveikslėlis) iškart prarasta 1.45 Ah baterijos talpos, toliau didėjant ciklų skaičiui baterijos talpa sumažėjo papildomai sumažėjo 1 Ah.



2.1.2.5 pav. Talpos sumažėjimo grafikas 0°C.

Papildomas testavimas atliekamas esant -20 °C aplinkos temperatūrai, esant 0.3C įkrovimo srovei. Dėl pakitusių baterijos savybių net esant 0.3C ir 50 % SOC iškrovai baterijos įtampa krenta iki 195V (2.3V celei) tai yra žemiau minimalios leidžiamos įtampos. Teoriškai baterijos talpa sumažėja dvigubai. 2.1.2.6 paveikslėlyje pateiktas baterijos įtampos ir SOC verčių vaizdas.



2.1.2.6 pav. Įtampos ir iškrovos grafikai -20 °C.

Atlikus baterijų bloko įkrovimo ir iškrovimo ciklų modeliavimą aiškia matoma aplinkos temperatūros įtaka, tiek baterijų talpai, tiek įtampai. Gamintojas rekomenduoja baterijas įkrauti 0 °C ~ 45 °C, iškrauti -20 °C ~ 55 °C temperatūroje. Iškrovimo metu esant nulinei arba neigiamai

bloko temperatūrai pastebimas savaiminis temperatūros padidėjimas dėl bloke naudojamų celių vidinės varžos šiluminių nuostolių. Norint eksploatuoti baterijų bloką šaltame klimato privalomas priverstinis baterijų bloko šildymas.

2.1.3. Baterijų bloko balansavimo trukmės įvertinimas

Baterijų bloko celių balansavimo trukmė priklauso nuo bloką sudarančių celių įkrovimo lygio išsibarstymo. Balansavimo trukmę taip pat apsprendžia ir balansavimo rezistoriumi tekanti srovė. Balansavimo srovė tam tikrai laiko trukmei surandama 21 formule.

$$\text{balansavimo srovė } (A) = \frac{\text{maksimalus nuotėkis } (A) - \text{minimalus nuotėkis } (A)}{\frac{\text{galima balansavimo trukmė } (h)}{24h}} \quad (21)$$

Remiantis tiriamų CALB L135F72 celių gamintojo specifikacijomis baterijos savaiminis išsikrovimas siekia iki 5% per 1 mėnesį, kai baterijos talpa Vatvalandėmis lygi (22 formulė):

$$3.3 V \times 72 Ah = 238 Wh \quad (22)$$

Parandamos iki 12Wh energijos per mėnesį, kai savaiminis išsikrovimas siekia iki 5% (prasčiausios celės pilnai išsikraus per 20 mėn.) , o savaiminio išsikrovimo srovė apytiksliai lygi ir surandama pagal 23 formulę.

$$\frac{72 Ah}{20 \text{ mėn} \times 30 \text{ d} \times 24 \text{ h}} \leq 5 mA \quad (23)$$

Papildoma nuotėkio srovė taip pat gaunama celės įtampos matavimo grandinėje ir dėl balansavimo grandinės komutavimo rakto parazitinio laidumo. 2.1.3.1 lentelėje teoriškai apskaičiuoti balansavimo trukmės bandymo rezultatai su 3% SOC išsibarstymu naudojant 10 Ω, 22 Ω, 33 Ω, 100 Ω, 200 Ω, 500 Ω balansavimo rezistorius.

2.1.3.1 lentelė. Celių balansavimo trukmės skaičiavimai.

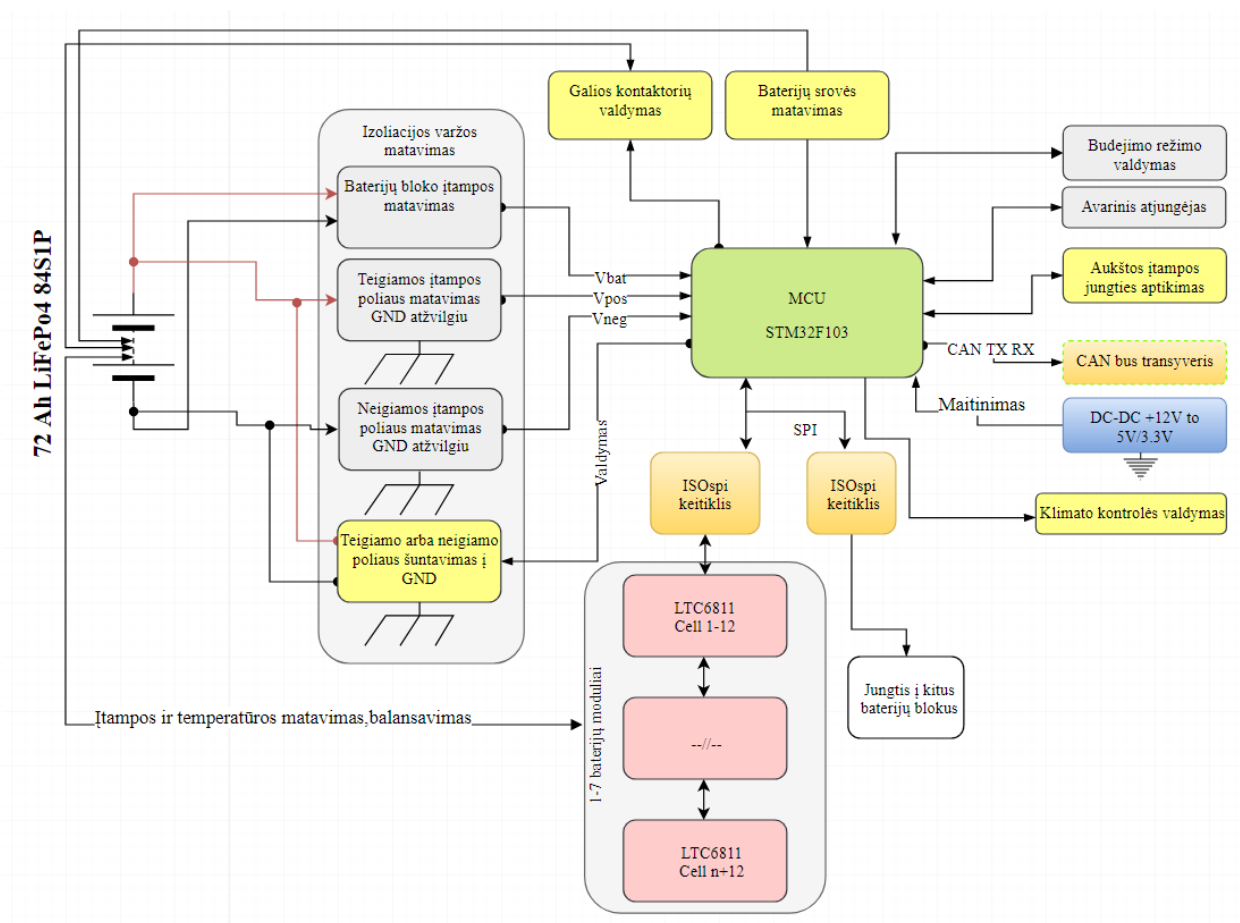
| Balansavimo srovė, mA | | | | 330 | 150 | 100 | 33 | 16,5 | 6,6 |
|------------------------|------------------------------|-----------------|---------|--|------|------|------|------|--------|
| Balansavimo varža, Ohm | | | | 10 | 22 | 33 | 100 | 200 | 500 |
| Cel | SOC, % | Celės įtampa, V | ΔAh | Individualios celė balansavimo trukmė, h | | | | | |
| 1 | 98 | 3,352 | 1,44 | 4,3 | 9,45 | 14,2 | 43 | 85,9 | 214,8 |
| 2 | 99,9 | 3,367 | 0,072 | 0,2 | 0,47 | 0,71 | 2,14 | 4,28 | 10,694 |
| 3 | 99 | 3,359 | 0,72 | 2,1 | 4,72 | 7,07 | 21,4 | 42,9 | 107,16 |
| 4 | 97,1 | 3,346 | 2,088 | 6,2 | 13,7 | 20,6 | 62,4 | 125 | 312,04 |
| 5 | 97,9 | 3,351 | 1,512 | 4,5 | 9,93 | 14,9 | 45,1 | 90,2 | 225,59 |
| 6 | 97,4 | 3,348 | 1,872 | 5,6 | 12,3 | 18,5 | 55,9 | 112 | 279,59 |
| 7 | 99,4 | 3,363 | 0,432 | 1,3 | 2,83 | 4,24 | 12,8 | 25,7 | 64,238 |
| 8 | 98,4 | 3,355 | 1,152 | 3,4 | 7,55 | 11,3 | 34,3 | 68,7 | 171,69 |
| 9 | 97,3 | 3,347 | 1,944 | 5,8 | 12,8 | 19,2 | 58,1 | 116 | 290,4 |
| 10 | 99,9 | 3,367 | 0,072 | 0,2 | 0,47 | 0,71 | 2,14 | 4,28 | 10,694 |
| 11 | 99 | 3,359 | 0,72 | 2,1 | 4,72 | 7,07 | 21,4 | 42,9 | 107,16 |
| 12 | 98,6 | 3,356 | 1,008 | 3,0 | 6,61 | 9,91 | 30 | 60,1 | 150,16 |
| 13 | 97,3 | 3,347 | 1,944 | 5,8 | 12,8 | 19,2 | 58,1 | 116 | 290,4 |
| 14 | 98,4 | 3,355 | 1,152 | 3,4 | 7,55 | 11,3 | 34,3 | 68,7 | 171,69 |
| 15 | 98,2 | 3,353 | 1,296 | 3,9 | 8,5 | 12,8 | 38,6 | 77,3 | 193,23 |
| 16 | 97,8 | 3,351 | 1,584 | 4,7 | 10,4 | 15,6 | 47,3 | 94,6 | 236,38 |
| 17 | 98,2 | 3,353 | 1,296 | 3,9 | 8,5 | 12,8 | 38,6 | 77,3 | 193,23 |
| 18 | 97,7 | 3,350 | 1,656 | 4,9 | 10,9 | 16,3 | 49,4 | 98,9 | 247,17 |
| 19 | 97,9 | 3,351 | 1,512 | 4,5 | 9,93 | 14,9 | 45,1 | 90,2 | 225,59 |
| 20 | 99,6 | 3,364 | 0,288 | 0,9 | 1,88 | 2,83 | 8,56 | 17,1 | 42,805 |
| 21 | 97,8 | 3,351 | 1,584 | 4,7 | 10,4 | 15,6 | 47,3 | 94,6 | 236,38 |
| | | | | | | | | | |
| | SOC(max) | 99,9 | Ah(max) | 6,2 | 13,7 | 6,24 | 13,7 | 20,6 | 62,407 |
| | SOC(min) | 97,1 | Ah(min) | 3,34576 | 0,07 | 0,21 | 0,47 | 0,71 | 2,1387 |
| | | | | | | | | | |
| | Bendra balansavimo trukmė, h | | | 6 | 14 | 21 | 62 | 125 | 312 |

SOC vertės išsibarstymas sveikame baterijų bloke sąlyginai mažas, taip pat kaip ir individualių celių įtampų, tačiau siekiant maksimaliai išnaudoti visą baterijų bloko talpą balansavimas užima gan didelę įkrovimo proceso dalį. Atsižvelgiant į tai, kad elektromobilis didžiąją laiko dalį stovi prijungtas prie įkrovimo stotelės, net ir esant mažai 33 mA balansavimo srovei pasiektų balansą apytikslei per savaitę.

2.2. Baterijų bloko valdymo grandinių projektavimas

Analitinėje darbo dalyje atlikta balansavimo ir baterijų įtampos stebėsenos rinkoje esančių IG analizė, remiantis kainos ir funkcionalumo santykiu pasirinktas LTC6804 IG. Dėl didelės paklausos rinkoje, išleista atnaujinta IG versija LTC6811, kuri panaudota bandymų metu. Šis IG atsparesnis aplinkos poveikiams ir pigesnis už savo pirmtaką. LTC6804HG-1#TRPBF kaina perkant daugiau kaip 100 vnt. – 14.27 USD, tuo tarpu atnaujinta versija LTC6811HG-1#TRPBF perkant daugiau kaip 100 vnt. – 10.74 USD [28]. Sistemą sudaro izoliacijos varžos matavimo grandinės, maitinimo šaltinio blokas, du nepriklausomi isoSPI keitikliai, CAN komunikacijos

blokas, galios kontaktorių valdymo grandinė su minkšto paleidimo funkcija, aukštos įtampos baterijų srovės matavimo grandinės, baterijų dėžės klimato kontrolės valdymo grandinė. Sistema valdoma STM32F105, kuris pasižymi gausia komunikacijos tipų periferija. Suprojektuotos sistemos struktūrinė diagrama pateikiama žemiau 2.2.1 paveikslėlyje



2.2.1 pav. Baterijų bloko valdymo struktūros principinė schema.

2.2.1. Sistemos veikimo algoritmas

Sistemos veikimo algoritmas sukurtas vadovaujantis analitinėje dalyje apžvelgta medžiaga. Naudojamas nuoseklaus tipo algoritmas be pabaigos taško, tai reiškia, kad vieną kartą įjungus sistemą tol kol bus 12 V maitinimas sistema neišsijungs. Išjungus elektromobilį valdymo modulis pereina į miego režimą, kuriame sumažinamas sistemos funkcionalumas, matuojama tik baterijų bloko celių įtampa ir temperatūra, laukiama CAN protokolu priimamos žinutės apie elektromobilio įjungimą. 2.2.1.1 paveikslėlyje pateiktas pagrindinis sistemos veikimo algoritmas.

Įjungus degimo signalą paleidžiamas baterijų bloko valdymo modulis. Atliekamas sistemos veikimą stabdančių veiksnių tikrinimas: tikrinama ar yra įstatytas servizo atjungėjas su saugikliu, tikrinama ar pajungta aukštos galios įtampos kabelio jungtis. Jei kažkuris iš veiksnių nėra tenkinamas išsiunčiama aptarnavimo indikacija CAN protokolu, sistema vėl tikrina ar yra tenkinamos anksčiau paminėtos sąlygos. Jei pirmi du veiksmai teigiami, vykdomas visų baterijų

bloko celių įtampų ir temperatūrų patikrinimas. Palyginamos išmatuotos įtampų ir temperatūrų vertės su iš anksto nustatytais kritinėmis vertėmis, jei sąlyga netenkinama indikuojama sistemos klaida. Sistema priverstinai išjungžiama. Jei įtampos ir temperatūros matavimo sąlygos tenkinamos sujungiami galios kontaktoriai.

Galios kontaktorių sujungimas vykdomas žingsniais: įjungiamas neigiamas baterijų bloko kontaktorius, tikrinama ar pavyko sujungti indukaciniu kontaktu. Jei sujungimas pavyko, pradedamas minkštas sistemos paleidimas, įjungžiama minkšto paleidimo kontaktorius, matuojama baterijų bloko įtampa sistemos išėjime. Jei įtampa pasiekia pradiniuose nustatymuose numatytą, įjungžiamas teigiamas baterijų bloko kontaktorius. Tikrinama ar pavyko sujungti teigiamą kontaktorių indukaciniais kontaktais. Energijos taupymo sumetimais atjungžiamas minkšto paleidimo kontaktorius. Jei nors vienas iš paminėtų procesų neįvykdomas indikuojama sistemos klaida.

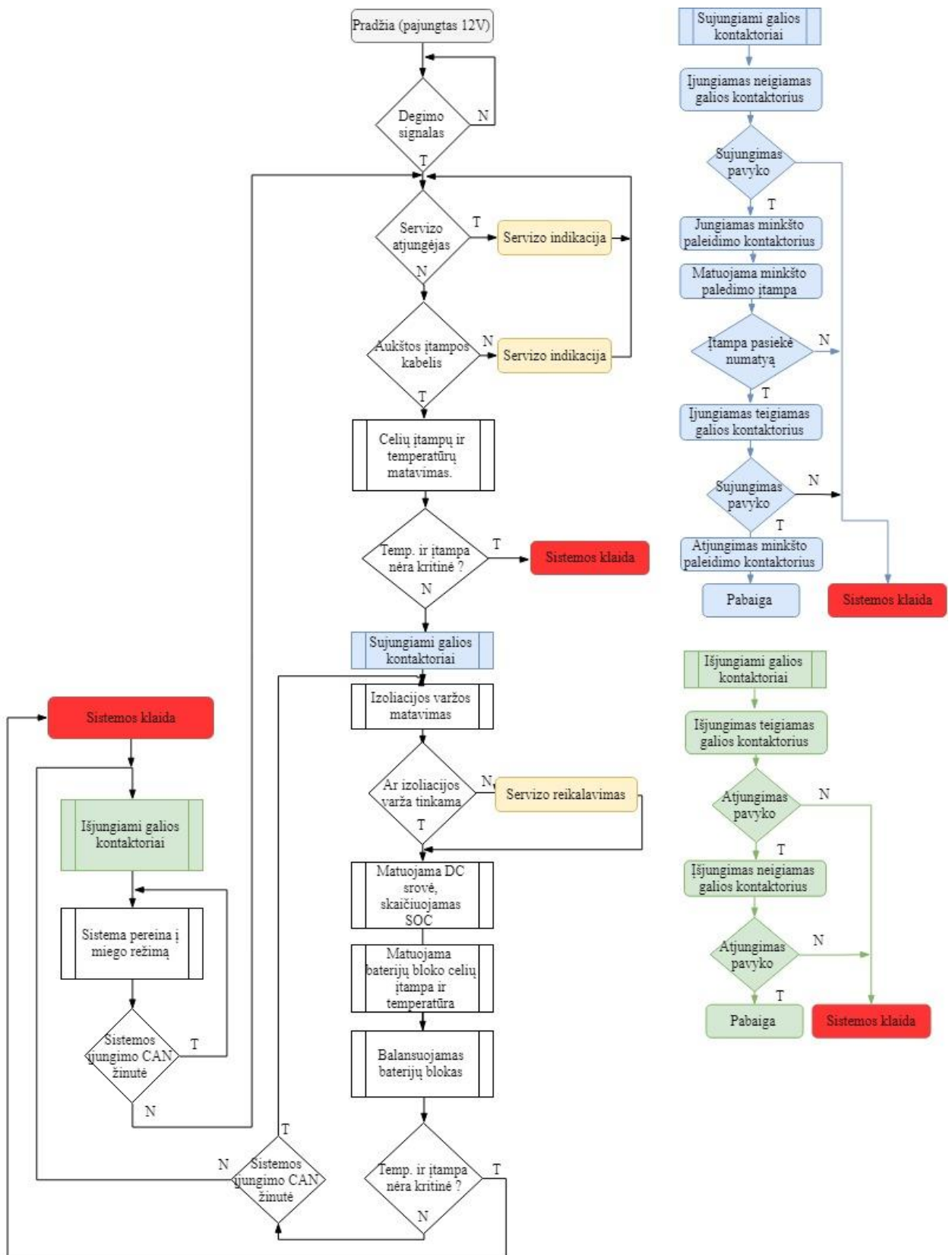
Sėkmingai sujungus baterijų bloko kontaktorius atliekamas izoliacijos varžos matavimas. Jei izoliacijos varža yra mažesnė už $500 \Omega/V$ remiantis saugos reikalavimais indikuojamas aptarnavimo reikalavimas.

Matuojama baterijų bloku tekanti srovė. Skaičiuojamas baterijų įkrovos lygis (SOC %).

Matuojama baterijų bloko celių įtampa ir temperatūra. Balansuojamas baterijų blokas. Jei baterijų bloko celių įtampa arba temperatūra pasiekia kritinę, indikuojama sistemos klaida. Išjungžiami galios kontaktoriai ir balansavimas.

Jei baterijų įtampa ir temperatūra yra normos ribose, tikrinama ar gaunamas sistemos veikimą indikuojantis CAN pranešimas, jei pranešimas negaunamas, atjungžiami galios kontaktoriai.

Atjungžimas vykdomas pirmiausia atjungžiant teigiamą baterijų bloko kontaktorių, jei kontaktorius atsijungži, tuomet atjungžiamas neigimas baterijų bloko kontaktorius. Jei nepavyksta atjungžti vieno iš kontaktorių, indikuojama sistemos klaida.



2.2.1.1 pav. Baterijų bloko valdymo struktūros principinė schema.

2.2.2. Izoliacijos varžos matavimo grandinės

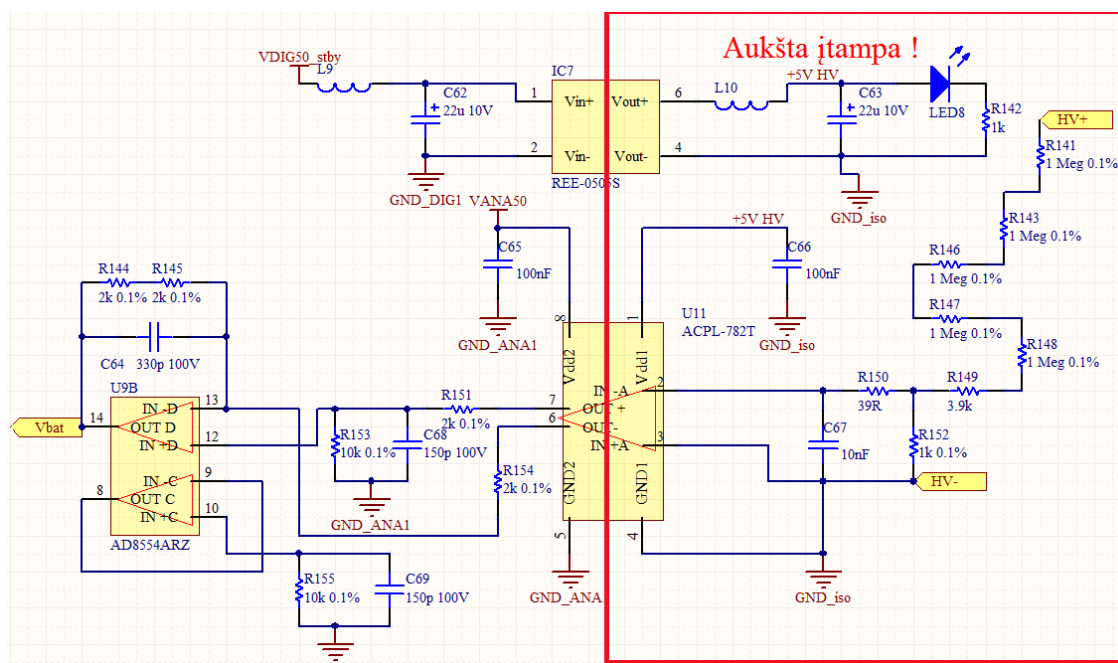
Izoliacijos varžos matavimo grandinės suprojektuotos atsižvelgiant į elektromobilių saugos reikalavimų Nr. 99, 100 taisyklę. Reikalavimai ir veikimo principas aprašomi teorinėje tiriamojo darbo dalyje. Izoliacijos varža pakankama jei nuolatinės srovės atveju yra didesnė už 500 Ω/V , arba kintamos srovės atveju, 100 Ω/V matuojant aukštos įtampos laidininko ir elektromobilio kėbulo atžvilgiu.

Izoliacijos varžos matavimui reikalingos trys aukštos įtampos matavimo grandinės ir dvi šuntavimo grandinės. Matavimai ir šuntavimas atitinkamai atliekami tarp:

- Matuojama elektromobilio baterijų bloko bendra įtampa;
- Matuojama baterijų bloko teigiamo poliaus įtampa elektromobilio kėbulo atžvilgiu;
- Matuojama baterijų bloko neigiamo poliaus įtampa elektromobilio kėbulo atžvilgiu;
- Šuntuojama baterijų bloko teigiamo poliaus įtampa elektromobilio kėbulo atžvilgiu;
- Šuntuojama baterijų bloko neigiamo poliaus įtampa elektromobilio kėbulo atžvilgiu.

Baterijų įtampos matavimo grandinė

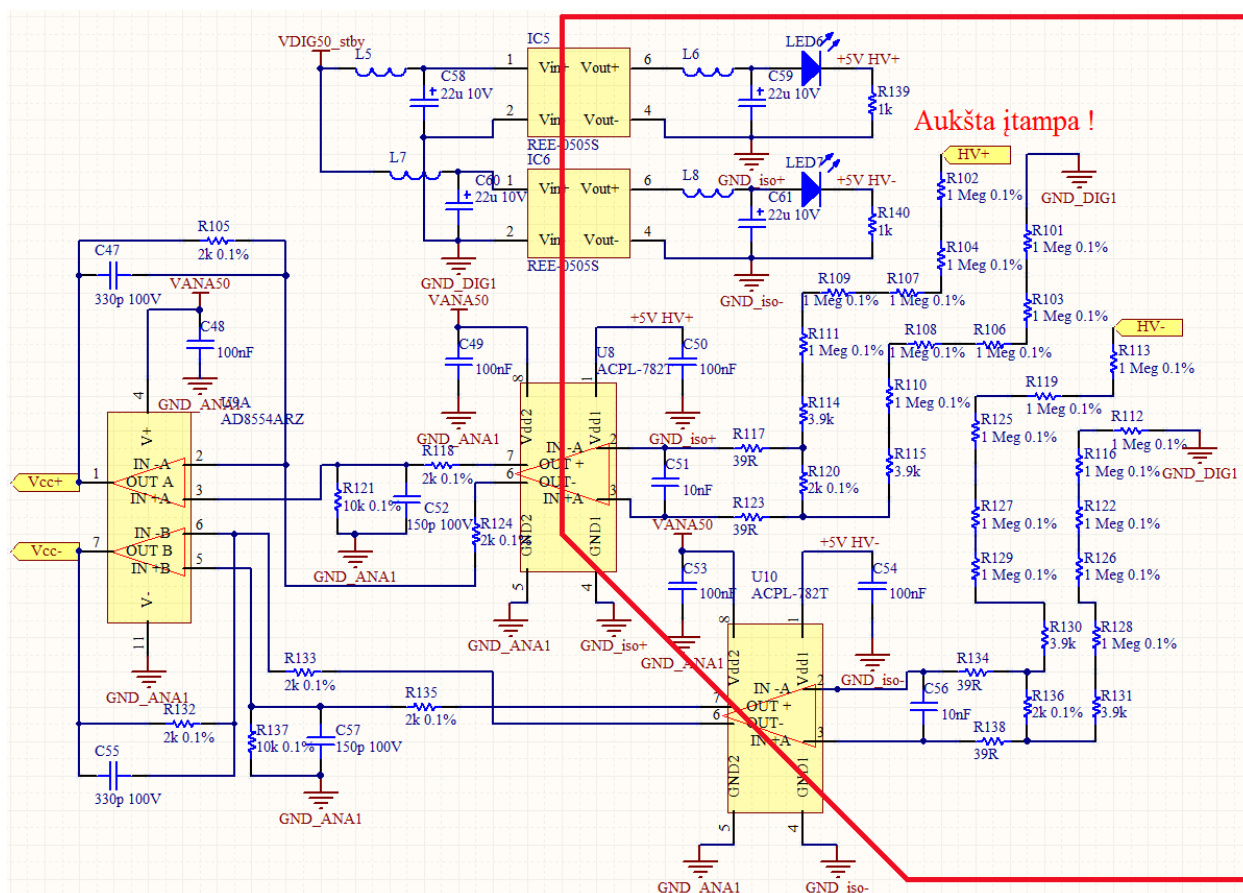
Visi matavimai tarpusavyje turi būti galvaniškai atišti, dėl grandinių įnešamos matavimo grandinės įėjimo varžos. Matuojamos įtampos vertės perduodamos izoliuojančiu operaciniu stiprintuvu ACPL-782T, kurio aukštosios įtampos pusė maitinama izoliuotu 5 V DC-DC keitikliu REE-0505S. 2.2.2.1 paveikslėlyje pateikiama baterijos įtampos matavimo grandinė, kuri leidžia matuoti iki 500 V įtampą ir turi 5 M Ω įėjimo varžą, pasirinktos 0,1 % tikslumo varžos siekiant didesnio matavimo tikslumo. 0 V sistemos įėjime atitinka 1,585 V išėjime, 500 V įėjime – 2,628 V išėjime.



2.2.2.1 pav. Baterijų įtampos matavimo grandinė.

Įtampų tarp elektromobilio kėbulo ir baterijų bloko teigiamo ir neigiamo poliaus matavimo grandinės

Nuotėkio įtampos matavimas atliekamas analogiška grandine kaip ir baterijos įtampos matavimas, tačiau padidinama matavimo prietaiso įėjimo varža iki 10 MΩ siekiant kaip įmanoma sumažinti srovės nuotėkį į elektromobilio korpusą, pasirinktos 0,1% tikslumo varžos siekiant didesnio matavimo tikslumo. Kadangi priklausomai nuo srovės nuotėkio vietos (teigiamas baterijos polius į korpusą, arba neigiamas baterijos polius į korpusą) galimos tiek neigiamos tiek teigiamos matuojamos įtampos vertės. Norint išmatuoti tokias įtampas reikalingas 0V vidurio taško matavimo būdas. STM32F105 mikrovaldikliu galima išmatuoti tik teigiamas įtampas todėl naudojamas matavimo būdas su pakeltu 0 tašku, kuris šiuo atveju matavimo išėjime atitinka 1,583 V. Teigiamą 500 V įėjimą – 2,638 V išėjimą, neigiamą 500 V įėjimą – 0,514 V išėjimą. Matavimo grandinės schema pateikta 2.2.2.2 paveikslėlyje.

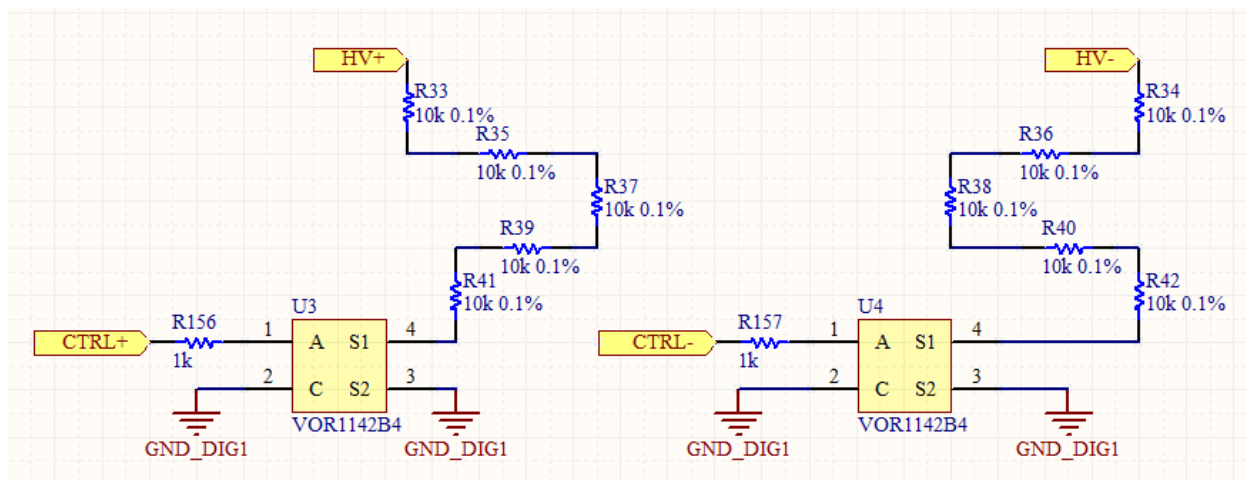


2.2.2.2 pav. Įtampų tarp elektromobilio kėbulo ir baterijų bloko teigiamo ir neigiamo poliaus matavimo grandinės.

Izoliacijos varžos matavimas atliekamas įtampų palyginimo metodu. Priklausomai nuo to iš kurio baterijos poliaus vyksta srovės nuotėkis į elektromobilio korpusą, atliekamas papildomas izoliacijos varžos šuntavimas žinomo nominalo varža kuri parenkama pagal maksimalią sistemos darbinę įtampą (1) formulė:

$$R_{\text{šuntavimo}} = V_{\text{bat}} \times 100 \, \Omega \quad (1)$$

Sistema skaičiuojama 500 V maksimaliai darbinei įtampai. Todėl šiuo atveju šuntavimo varža lygi 50 kΩ, pasirinktos 0,1% tikslumo varžos siekiant didesnio matavimo tikslumo. Šuntavimas atliekamas puslaidininkine rele su optiniu izoliavimo barjeru. Šuntavimo grandinių vaizdas pateiktas 2.2.2.3 paveikslėlyje.



2.2.2.3 pav. Įtampų tarp elektromobilio kėbulo ir baterijų bloko teigiamo ir neigiamo poliaus šuntavimo grandinės.

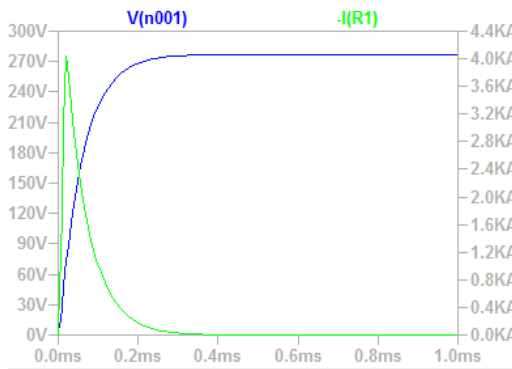
Šuntavimo grandinės valdomos puslaidininkinėmis relėmis VOR1142B4. Dvigubas lauko tranzistorius puslaidininkinėje relėje leidžia valdyti kintamą srovę. Ši savybė svarbi, nes pramušimo atveju galima tiek neigiama tiek teigiama įtampa krentanti šuntavimo grandinėje.

2.2.3. Minkšto paleidimo, kontaktorių ir šildytuvo valdymo grandinės

Minkšto paleidimo sistema yra privaloma norint užtikrinti saugų ir patikimą sistemos veikimą. Elektromobilyje yra bent 2 prietaisai (variklio valdiklis, DC-DC keitiklis sistemos maitinimui), kurių įėjime yra didelės talpos kondensatorių. Sistema prie baterijų bloko prijungiama GIGAVAC GV200 [29] kontaktoriais. Kontaktoriai gali atlaikyti iki 500A srovę. Anksčiau tirtu baterijų bloko vidinė varža yra apie 0.05Ω, darbinė įtampa 277V. Sistemoje naudojami SAE MKP61A0450D108J005, parametrai pateikiami žemiau:

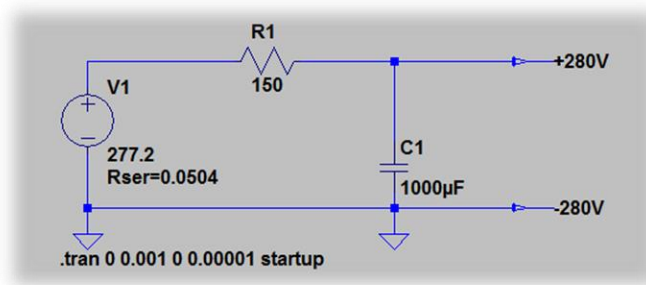
- Darbinė įtampa 450 Vdc;
- Talpa 1000 uF;
- Srovė RMS 250 A;
- Vidinė varža 6 m Ω ;
- Nuoseklus induktyvumas 20 nH.

LTspice programine įranga sumodeliuojama srovė įjungimo momentu be minkšto paleidimo (2.2.3.1 paveikslėlis). Paleidimo srovė siekia 4 kA, tokios srovės neatlaikytų kontaktoriaus kontaktai, kas sukeltų jų susilydymą. Siekiant to išvengti reikalinga minkšto paleidimo grandinė.



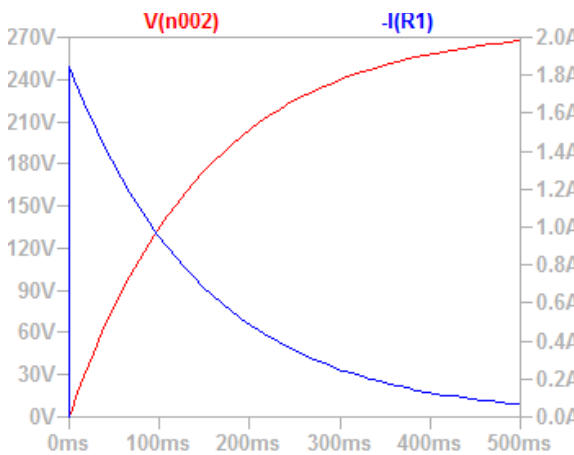
2.2.3.1 pav. Kondensatoriaus įkrovimas be minkšto paleidimo.

Minkšto paleidimo grandinė sudaryta iš elementarios nuosekliai jungtos varžos per kontaktorių pateikta 2.2.3.2 paveikslėlyje.



2.2.3.2 pav. Minkšto paleidimo schema.

Esant minkštam paleidimui kondensatoriumi tekanti įkrovimo srovė siekia tik 1.8A tokia srovė yra saugi sujungimo kontaktams. Kondensatoriaus įkrovimo trukmė iki darbinės baterijų įtampos (5τ) apytiksliai lygi 500 ms. Įkrovimo trukmės grafikas pateiktas 2.2.3.3 paveikslėlyje.

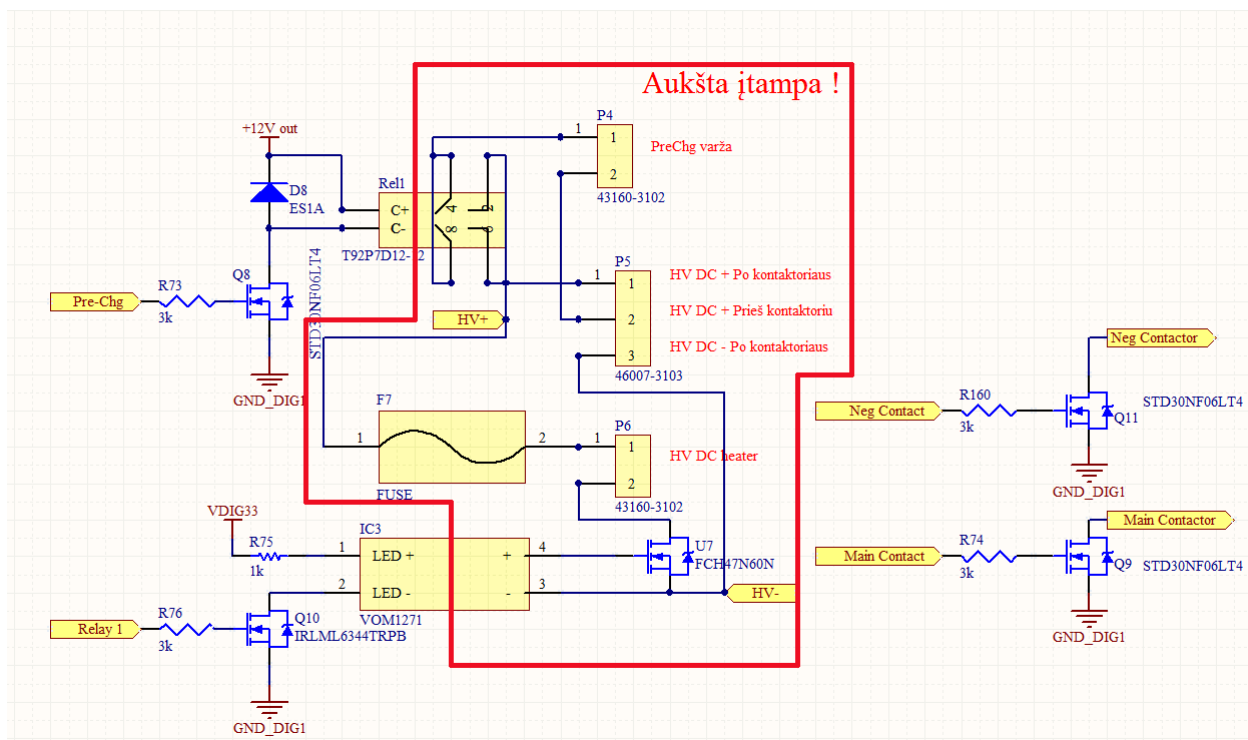


2.2.3.3 pav. Kondensatoriaus įkrovimas su minkštu paleidimu.

Sistemos minkštas paleidimas yra būtinas tiek galios kontaktorių apsaugai, tiek elektromagnetinio suderinamumo trikdžiams sumažinti. Sujungiant didelės galios kontaktus į aplinką išsispinduliuojamas trumpas didelės galios elektromagnetinis impulsas, kuris gali sutrikdyti visą sistemos veikimą.

Minkšto paleidimo grandinės dalis įprojektuota į PCB. Tai leidžia supaprastinti sistemos pajungimą. Minkštas paleidimas vykdomas įjungiant neigiamą galios kontaktorių ir minkšto paleidimo relę su nuosekliai jungtu 150Ω 100 W galios rezistoriumi. Teigiamas ir neigiamas galios kontaktoriai valdomi N kanalo lauko tranzistoriais (2.2.3.4 paveikslėlis).

Baterijų bloko šildytuvą valdomas N kanalo lauko tranzistoriumi FCH47N60N 600V 47 A $62 \text{ m}\Omega$. Tranzistoriaus užtūros izoliavimas atliekamas fotovoltiniu izoliatoriumi VOM1271. Kuris užtikrina pilną tranzistoriaus įsijungimą ir greitą išsijungimą. Baterijų bloke naudojamas 150W šildytuvas. Esant įjungtam šildytuvui, kuris maitinamas 280V įtampa iš baterijų bloko tranzistoriumi teka 0.53 A srovė. Atsižvelgiant į tranzistoriaus technines specifikacijas deklaruojamas $40 \text{ }^\circ\text{C/W}$ šilumos atidavimas į aplinką. Fotovoltinio izoliatoriaus išėjimo įtampa lygi 8.4 V . Esant 8.4 V užtūros įtampai ir 0.53 A santakos ištakos srovei, tranzistoriuje išsiskiria apytiksliai 0.018 W galios. Išsiskiriant tokiai galiai galimas $0.72 \text{ }^\circ\text{C}$ laipsnio tranzistoriaus temperatūros padidėjimas virš aplinkos temperatūros. Papildomai į šildytuvo grandinę jungiamas 3A aukštos įtampos saugiklis.



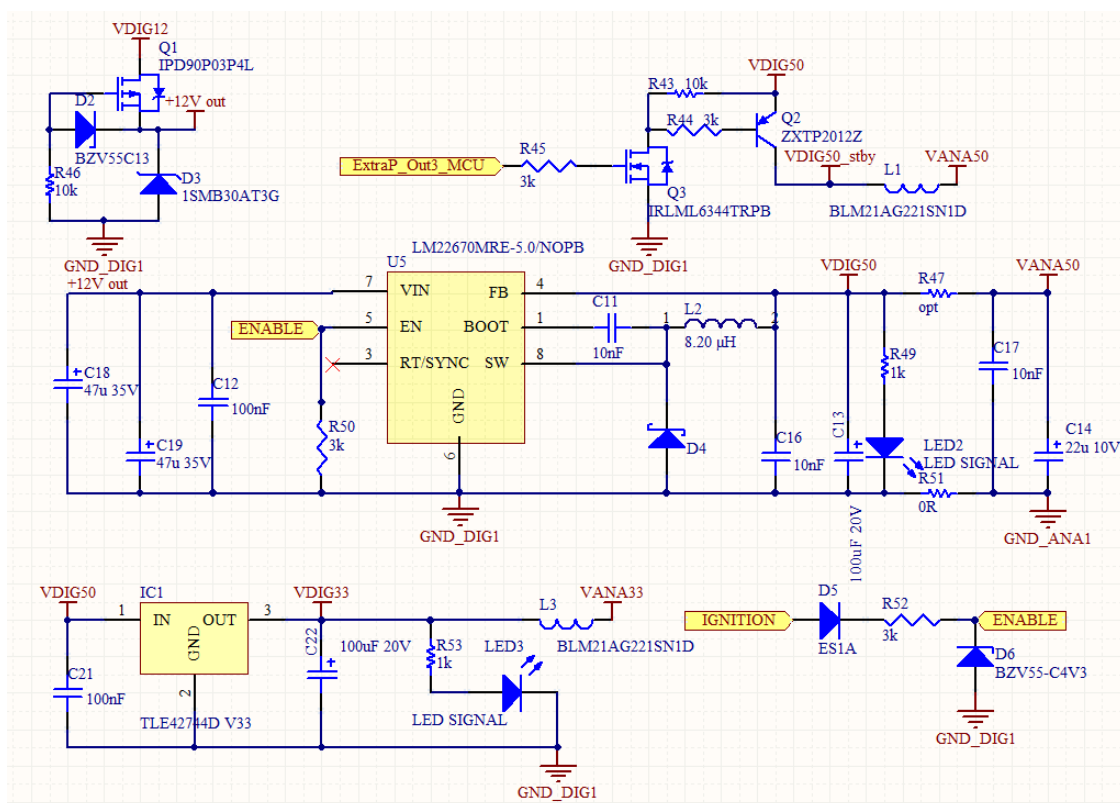
2.2.3.4 pav. Minkšto paleidimo, kontaktorių ir šildytuvo valdymo grandinės

2.2.4. Baterijų bloko valdymo grandinių maitinimo šaltinių projektavimas

Maitinimo grandinės suprojektuotos taip, kad būtų įmanoma maksimaliai sumažinti sistemos galios suvartojimą budėjimo režime. Pagrindinis įtampos keitiklis LM2260 elektromobilio 12V baterijos įtampą verčia į 5V įtampą žeminančio įtampos keitiklio topologijoje. Suformuota papildoma analoginė žemė matavimo grandinėms užtikrina minimalų matuojamų signalų triukšmo lygį. Papildomas linijinis 3.3V įtampos stabilizatorius skirtas STM32F105 mikrovaldiklio maitinimui.

BMS sistema pirmą kartą įjungiamą degimo signalu iš automobilio užvedimo spynelės. Po pirmo įjungimo sistema niekada pilnai neišsijungia tol kol tiekama 12V maitinimo įtampa. Sistema pereina į miego režimą kai CAN duomenų linija nebegauna pranešimų apie sistemos įjungimo statusą.

Didžiausią energijos dalį suvartoja izoliacijos varžos matavimo grandinių galvaniškai izoliuoti maitinimo šaltiniai REE-0505S. Sistemai pereinant į miego režimą išjungiamos visos analoginės matavimo grandinės ir jų maitinimo šaltiniai. Tai atliekama PNP tranzistoriumi išjungiant analoginių grandinių maitinimą (2.2.4.1 paveikslėlis).



2.2.4.1 pav. Maitinimo grandinės

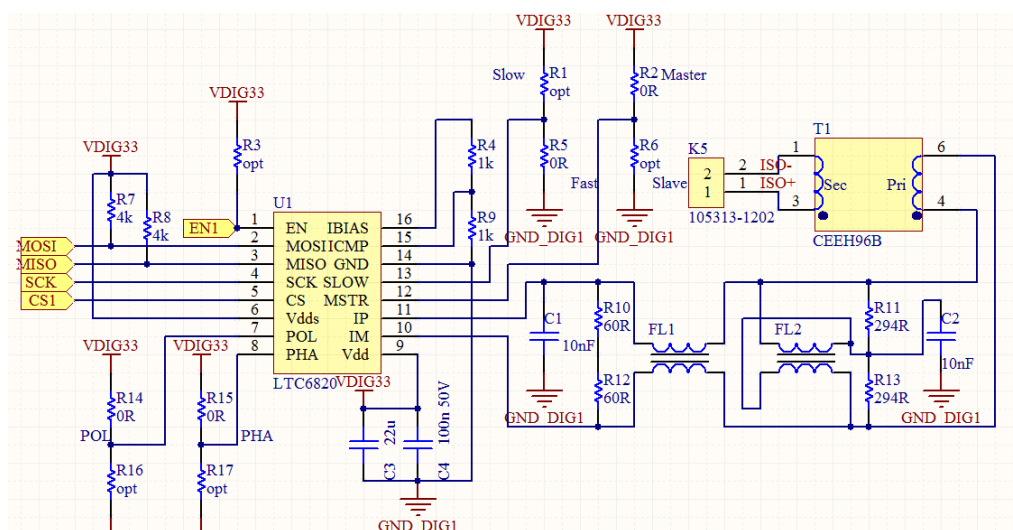
2.2.5. Komunikacinių grandinių realizavimas

Baterijų bloko įtampos, temperatūros stebėsenai ir balansavimui naudojami anksčiau minėti LTC6811 12 celių palaikantys valdikliai. Komunikacijai naudojama specialiai Linear Technology sukurta isoSPI sąsaja, kuri tradicinę 3 arba 4 laidų SPI sąsają paverčia dvilaidė sąsaja. Galimos dvi modulių jungimo tarpusavyje konfigūracijos. Nuoseklus jungimas (*angl. Daisy chain*) arba lygiagretus jungimas (*angl. Multi drop*). Kiekvienas jungimas turi savo pliusų ir minusų, tačiau esminis kriterijus yra duomenų linijos atsparumas triukšmams. Jei sistemoje naudojamas tik vienas BMS modulis tai bendras sistemos atsparumas triukšmams bus identiškas, tačiau didėjant modulių skaičiui lygiagretaus jungimo atveju su kiekvienu papildomu moduliu atsparumas triukšmams vis mažės. Kiekvieno modulio keliamas triukšmas duomenų linijoje sumuojasi. Nuoseklaus jungimo atveju kiekvienas modulis gautus duomenis persiunčia iš naujo, tuo pačiu atnaujina ir duomenų signalą, pašalina prieš tai į jį atkeliavusius signalo triukšmus.

Kiekvienas 12 celių baterijų grupės modulis turi skirtingą žemės potencialą todėl reikalingas funkcinis izoliavimas. Esminis sistemos sklendaus duomenų perdavimo garantas, tinkamas izoliuojančio transformatoriaus parinkimas, kuris galėtų tinkamai perduoti informaciją į 120 Ω banginės varžos vytos poros kabelį.

Galimi įvairūs izoliacinio transformatoriaus tipai ir jungimo būdai. Bandant kiek įmanoma supaprastinti transformatorių parinkimo procesą pasinaudota „LTspice“ programine įranga. Sumodeliuotos kai kurių gamintojų galimai tinkamų signalo perdavimo transformatorių dažninės charakteristikos pateiktos 2 priede.

Pasinaudojus modeliavimo duomenimis ir gamintojo rekomendacijomis suprojektuotas SPI-isoSPI keitiklis, kuris leis prie centrinės valdymo plokštės prijungti išorinius BMS modulius. Pasirinkta greitos komunikacijos opcija virš 200 kHz, konverteris bus pagrindinis įrenginys, o BMS moduliai atsakantys (2.2.5.1 paveikslėlis).



2.2.5.1 pav. SPI-isoSPI keitiklio schema.

SPI taktinis dažnis laukimo būsenoje būna aukštame lygyje, taktuojamas antruoju kylančiu frontu. Sistemoje naudojamos dvi atskiros identiškios SPI-isoSPI keitiklių poros, kurių viena naudojama pagrindinės baterijų dėžės celėms aptarnauti, antroji išoriniams baterijų blokams prijungti. Rezistoriais R4 ir R9 parenkama izoliuojančių transformatorių valdymo srovė ir grįžtamo duomenų signalo komparatoriaus įtampos lygis. Valdymo srovė surandama 24 formule:

$$I_{valdymo} = 20 * \frac{2V}{R4+R9} = 20 mA \quad (24)$$

Tuo tarpu signalo įtampa į kurią reaguos imtuvas lygi (25 formulė):

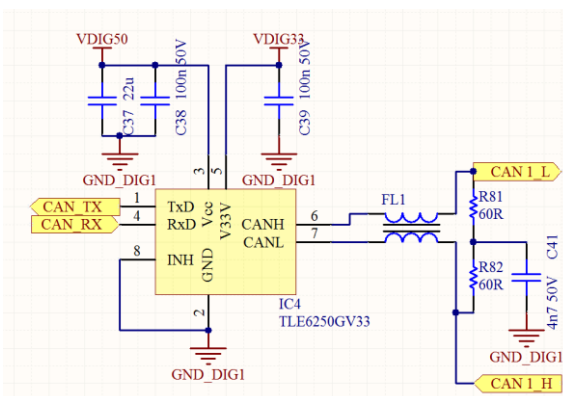
$$U_{signalo} = \frac{2V * R9}{R4+R9} = 1V \quad (25)$$

Žinant valdymo srovę ir kad duomenims perduoti naudojama pinta poros su 120 Ω linijos varža. Galime apskaičiuoti duomenų signalo amplitudę (26 formulė):

$$U_{signalo} = I_{valdymo} * \frac{120}{2} = 1.2V \quad (26)$$

Duomenų linijoje naudojama vyta pora iš 0.5 mm² laido, laidininko nuostoliai minimalūs, 0.2 V skirtumas tarp minimalaus priimamo signalo lygio ir realaus signalo lygio yra pakankamas patikimai gauti duomenims.

Komunikacijai su hibridine elektromobilio sistema naudojamas TLE6250GV33 automobilinis CAN protokolo komunikacijos blokas. Kuris atsparus įvairiems gedimams laidynuose. Trumpam jungimui į +12V, į GND, trumpam jungimui tarp CAN H ir CAN L duomenų linijų. CAN protokolo duomenų linijos jungiasi prie daugumos elektromobilio sistemos blokų, todėl suminis signalas triukšmas santykis duomenų linijoje didelis (2.2.5.2 paveikslėlis). Siekiant sumažinti signalas triukšmas lygį duomenų linijoje panaudotas sinfazinį triukšmą slopinantis filtras. Baterijų dėžė elektromobilyje yra galinis įrenginys todėl linija papildomai apkraunama 120 Ω suderinimo rezistoriumi. Šis rezistorius suderina linijos banginę varžą, taip eliminuojami signalo atspindžiai duomenų linijoje.



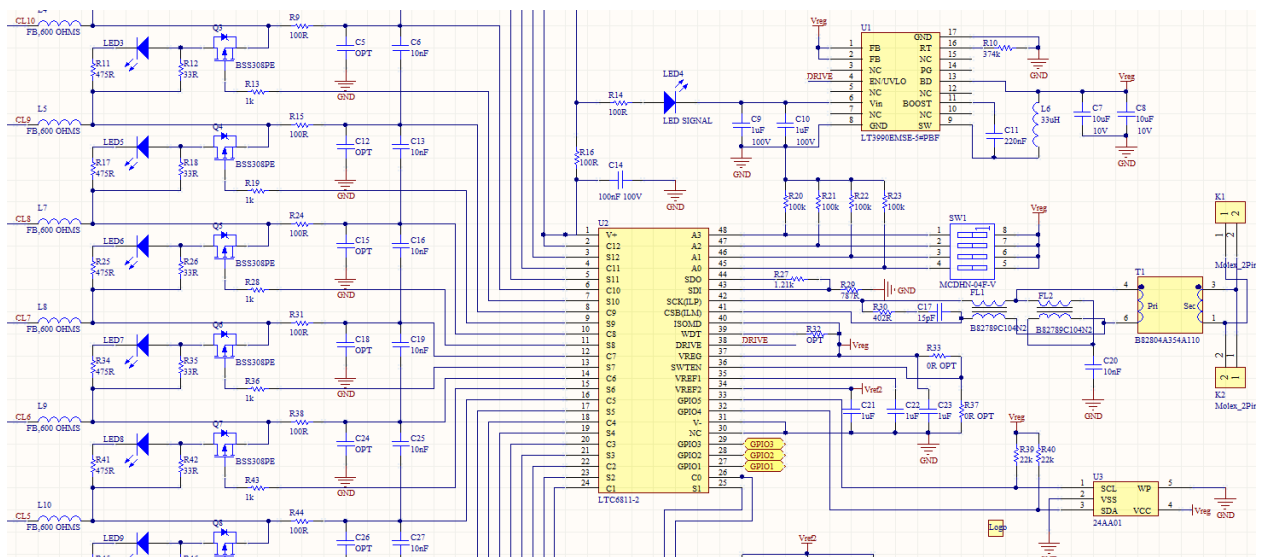
2.2.5.2 pav. SPI – ISOspi keitiklio schema.

BMS valdymo modulis su elektromobilio sistema komunikuoja 500kbit/s greičiu.

2.2.6. Baterijų bloko celių įtampos nuskaitymo ir balansavimo valdymo grandinės

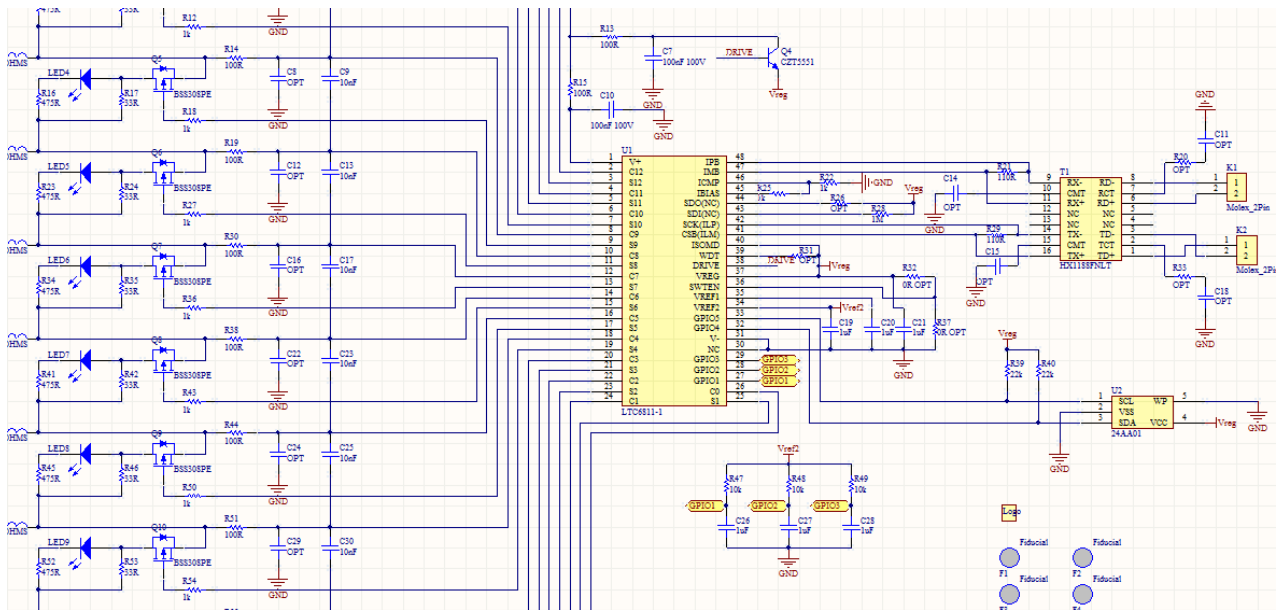
Suprojektuotos dvi skirtingos celių įtampos nuskaitymo ir balansavimo valdymo modulių versijos: nuoseklaus duomenų perdavimo ir lygiagretaus, su unikaliais adresais. Adresuojamų modulių privalumas tas, kad kiekvienas modulis turi savo adresą ir dirba nepriklausomai nuo sistemoje esančių kitų balansavimo modulių. Tuo trapu nuosekliai sujungtų modulių atveju, jei bent vienas modulis sugenda nebeatsako visi už jo esantys moduliai. Taip yra todėl, kad nuosekliame jungime kiekvienas modulis duomenis persiunčia per save. Kita vertus nuoseklus jungimas daug atsparesnis triukšmams ir mažesnė signalo atspindžio tikimybė, dėl trumpų duomenų linijų.

Lygiagretaus jungimo su LTC6811-2 valdikliu modulyje naudojama tokia pati transformatoriaus konfigūracija kaip ir SPI – isoSPI keitiklyje. Kadangi kiekvienas modulis lygiagretaus jungimo atveju turi savo adresą. 4 bitų adresas leidžia linijoje prijungti tik iki 16 prietaisų, taip pat lygiagretaus jungimas smarkiai apkrauna duomenų liniją, nes visi izoliavimo transformatoriai jungiami lygiagrečiai. Didesnėms energetinėms sąnaudoms patenkinti reikalingas papildomas DC-DC keitiklis. Sumažėjusi duomenų linijos signalo amplitudė pablogina signalas triukšmas santykį. Lygiagretaus jungimo BMS modulio principinės schemos fragmentas pateiktas 2.2.6.1 paveikslėlyje. Celių šuntavimas atliekamas per 33 Ω rezistorius su papildomais išoriniais tranzistoriais.



2.2.6.1 pav. Lygiagretaus jungimo balansavimo modulio principinės schemos fragmentas.

Nuoseklaus jungimo balansavimo modulis ženkliai paprastesnis, jame naudojamas NPN tranzistorius įtampos žeminimui. Nuosekliai jungimui įgalinti reikalingi du izoliuojantys transformatoriai, vienas duomenų įėjimui, kitas išėjimui. Pasirinktas dvigubas transformatorius su papildomu CM induktoriumi viename korpuse (2.2.6.2 paveikslėlis).



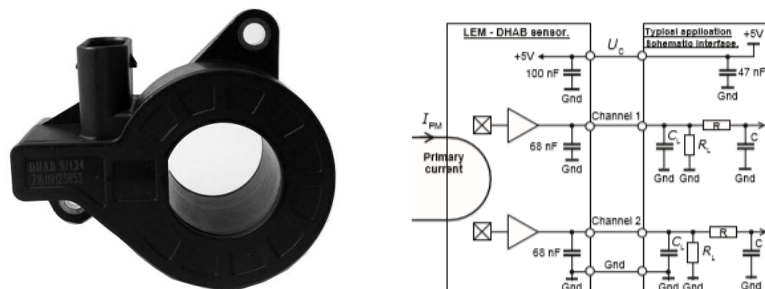
2.2.6.2 pav. Nuoseklaus jungimo balansavimo modulyje principinės schemos fragmentas.

Atliekant pirmuosius bandymus buvo iškart pastebėti lygiagreto jungimo trūkumai – signalo slopinimas nuo linijos apkrovos ir atspindžiai duomenų linijoje, todėl nuspręsta bandymus atlikti su patikimesnę komunikaciją palaikančiais nuoseklaus jungimo moduliais.

2.2.7. Baterijų srovės matavimo grandinė

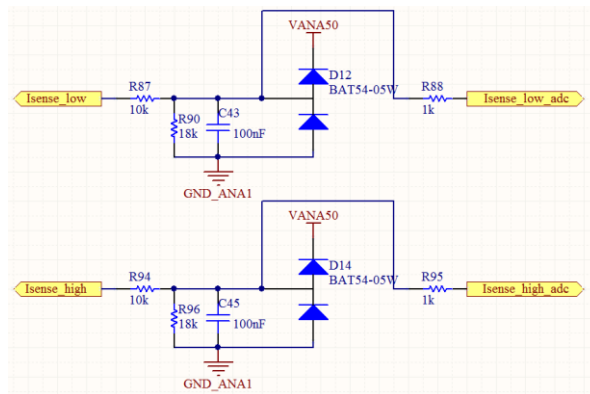
Srovės matavimui baterijų bloke panaudotas LEM DHAB S/124 holo efektu veikiantis dvigubo diapazono srovės jutiklis [30]. Srovės sensoriaus vaizdas pateiktas 2.2.7.1 paveikslėlyje.

- Vienpolis +5 V maitinimas;
- ± 75 A ir ± 500 A srovės matavimo diapazonai;
- -40 °C $+125$ °C darbinė temperatūra;
- ± 75 A, matavimo absoliutinė paklaida iki 2.5 A (-40 °C $+125$ °C);
- ± 500 A, matavimo absoliutinė paklaida iki 15 A (-40 °C $+125$ °C);
- Galvaninis izoliavimas.



2.2.7.1 pav. LEM DHAB S/124 holo efektu veikiantis dvigubo diapazono srovės jutiklis [30].

Srovės jutiklio signalas kinto nuo 0 iki 5 V su 2.5 V vidurio tašku, kadangi naudojamas STM32F105 mikrovaldiklis AK keitiklio maksimali įtampa negali būti didesnė nei 3.3 V. Geresniam matavimo diapazonui pasiekti naudojamas signalo daliklis, kuris 5V įtampą sumažina iki 3.214 V. Signalo triukšmui sumažinti taip pat panaudotas žemo dažnio RC filtras su 3 dB slopinimu ties 160 Hz. AK keitiklio apsaugai panaudoti įtampą ribojantys diodai. Schemos vaizdas pateiktas 2.2.7.2 paveikslėlyje.

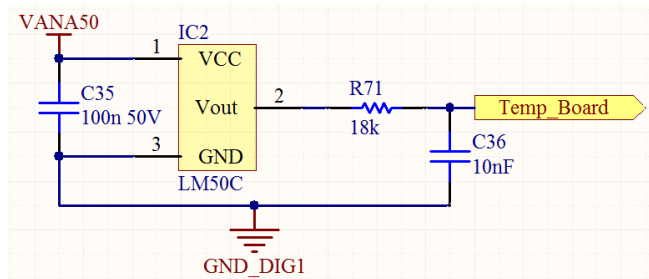


2.2.7.2 pav. Srovės jutiklio signalo apdorojimo grandinė.

STM32F105 mikrovaldiklis turi 12bit AK keitiklį, kuris teoriškai leidžia matuoti srovę nuo ± 40 mA iki ± 500 A atsižvelgiant į 1 bit skiriamąją gebą.

2.2.8. Baterijų bloko temperatūros matavimo grandinės

Temperatūrų matavimas atliekamas įvairiuose baterijų bloko vietose. Atraminis temperatūros jutiklis suprojektuotas pagrindinėje valdymo plokštėje. Jis skirtas visų baterijų dėžėje esančiu temperatūros matavimo jutiklių kalibravimui. Atraminio temperatūros matavimo jutiklio vaizdas pateiktas 2.2.8.1 paveikslėlyje.



2.2.8.1 pav. LM50C temperatūros jutiklis.

Jutiklio išėjime papildomai pajungtas žemo dažnio RC filtras. Išėjimo įtampa kinta nuo 100 mV iki 1.75 V atitinkamai $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ su $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ skiriamąja geba. Šis jutiklis turi tiesinę įtampos ir temperatūros kitimo priklausomybę, todėl papildomas kalibravimas nebūtinai, esant $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ aplinkos temperatūrai užtikrinamas $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ tikslumas [31].

Baterijų temperatūra matuojama $10\text{ k}\Omega$ NTC (neigiamo temperatūrinio koeficiento) termistoriais, kurie montuojama šalia teigiamo baterijos gnybto. Jutiklio vaizdas pateiktas 2.2.8.2 paveikslėlyje.



2.2.8.2 pav. NTC temperatūros jutiklis.

NTC termistoriaus varžos ir temperatūros priklausomybė nėra tiesinė todėl reikalingas programinis kreivės tiesinimas ir kalibravimas. Matavimo grandinė suformuojama varžiniu dalikliu iš $10\text{ k}\Omega$ rezistoriaus ir $10\text{ k}\Omega$ NTC termistoriaus. Maitinama iš 3V įtampos šaltinio. $20\text{ k}\Omega$ suminėje varžoje maitinamoje iš 3V įtampos šaltinio išskaidoma $0,45\text{ mW}$ galios. Termistoriaus techniniame aprašyme deklaruojamas 3 mW/K temperatūros augimas, išskaidomas $0,45\text{ mW}$ galios $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ aplinkos temperatūroje nesukels savaiminio jutiklio šilimo efekto.

Papildomai temperatūra matuojama celių įtampos matavimo ir balansavimo moduliuose, balansavimo rezistorių plote. Jei balansavimo metu rezistorių temperatūra pasiektų numatytą kritinę. Stabdomas baterijų bloko balansavimas.

2.2.9. PCB projektavimas

Spausdintinio montažo plokštės projektuotos atsižvelgiant į skirtingų įtampų potencialų išdėstymą PCB paviršiuje. Trasuojant elektrines jungtis didžiausią įtampų skirtumą turintys plokštės takeliai buvo maksimaliai atitolinti vienas nuo kito. Centrinėje valdymo plokštėje suprojektuotos papildomos izoliacinės išpjovos PCB paviršiuje siekiant kiek įmanoma sumažinti elektros lanko riziką iš aukštos įtampos grandinių į žemos įtampos valdymo grandines. Sistemą sudarančios elektrinės jungtys sutrasuotos keturių sluoksnių PCB. Impulsinės maitinimo grandinės atitrauktos nuo analoginių grandinių vengiant galimo impulsinių signalų patekimo į analoginius signalus per parazitinius ryšius. Panaudotas standartinis FR4 tipo lamintas su 1 oz storio vario sluoksniu ir HASL (*angl. HOT AIR SOLDER LEVELING*) padengimu. PCB matmenys 113 mm x 172 mm . Visos jungtys į išorinius mazgus su automobilinio klasifikavimo žymėjimu,

pasižyminčios padidintu atsparumu mechaniniams veiksniams. Priede P3 pateiktas centrinės valdymo plokštės PCB sluoksnių vaizdas. Taip pat pateiktas 3D modelio vaizdas.

Baterijų bloko celių įtampų nuskaitymo ir balansavimo moduliai suprojektuoti dviejų sluoksnių plokštėje, pagamintoje iš FR4 tipo laminto su 1 oz storio vario sluoksniu ir HASL padengimu. PCB matmenys 87 mm x 80 mm. Priede P4 pateiktas baterijų bloko celių įtampų nuskaitymo ir balansavimo plokštės PCB sluoksnių vaizdas. Taip pat pateiktas 3D modelio vaizdas.

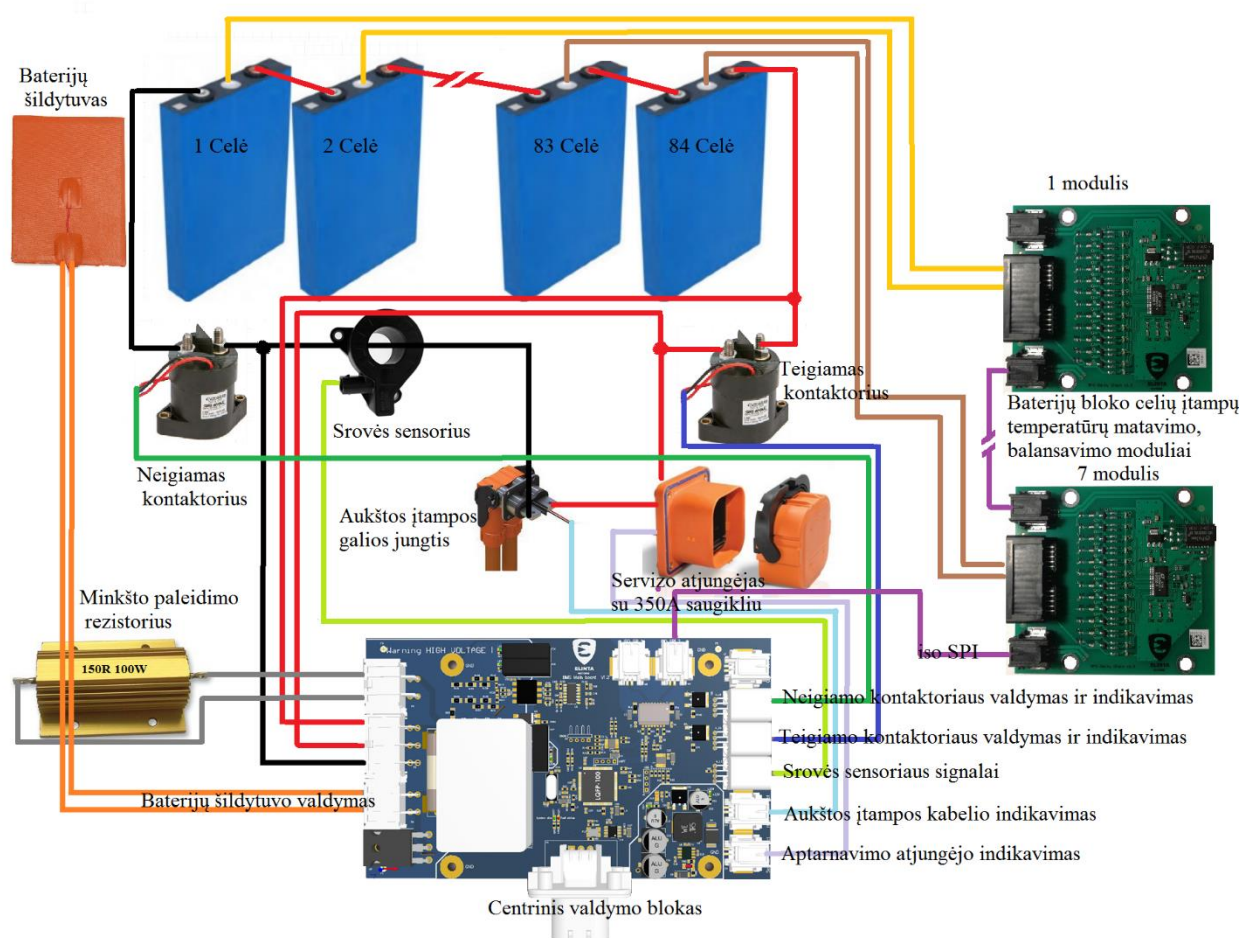
2.3. Apibendrinimai

Atlikus baterijų modeliavimą pastebėti esminiai aspektai į kuriuos reikia atsižvelgti eksploatuojant elektromobilio baterijų bloką:

1. Jei baterijų bloko darbinė temperatūra $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ rekomenduojama ženkliai mažinti naudojamą SOC langą. Kitu atveju galimas baterijų bloko iškrovimas žemiau rekomenduojamos įtampos;
2. Esant neigiamoms aplinkos temperatūroms tikslinga baterijų bloką priverstinai šildyti. Nuvažiuojamas atstumas bus didesnis net tuo atveju jei bloko šildytuvas bus maitinimas iš pačio baterijų bloko. Esant neigiamoms temperatūroms pastebimas ženklus momentinis talpos praradimas, kuris atsistato padidinus baterijų temperatūrą;
3. Baterijų bloko įtampos stebėjimas užtikrins baterijų bloko ilgaamžiškumą;
4. Baterijų blokas esant 3C iškrovoms savo temperatūrą padidina apie $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ virš aplinkos temperatūros. Tikslinga riboti iškrovimo srovę esant aukštai aplinkos temperatūrai.
5. Minkšto paleidimo grandinė yra privaloma siekiant užtikrinti galios kontaktorių ilgaamžiškumą ir saugumą.
6. Baterijų bloko balansavimo srovė turėtų būti įvertinta taip, kad balansavimas santykinai neužtruktų ilgiau nei įkrovimo procesas, tikslinga balansuoti baterijų bloką net neįkrovimo metu. Tokiu būdu bus greičiau pasiekiamas baterijų bloko balansas.

3. EKSPERIMENTINĖ DALIS

Eksperimentiniams tyrimams atlikti suprojektuotos valdymo grandinės prijungiamos prie išorinių sistemos elementų, kuriais suformuojamas visa baterijų blokas. Suprojektuota sistema sudaro 84 vienetų LiFePO₄ celių, kurios stebimos: įtampos, temperatūros matavimo ir balansavimo moduliais tarpusavyje komunikuojančiais isoSPI komunikacijos protokolu. Galios grandinė sudaro teigiamas ir neigiamas kontaktoriai, srovės matavimo sensorius, servizo atjungėjas su 350A saugikliu ir aukštos įtampos galios jungtis. Minkšto paleidimo srovės šuntvimas atliekamas per 150 Ω 100W galios rezistorių. Baterijos papildomai gali būti šildomos PTC šildymo elementu. Baterijų bloko sistemos vaizdas pateiktas 3.1 paveikslėlyje.



3.1 pav. Baterijų bloko struktūra.

Suprojektuotos baterijų bloko valdymo sistemos pradiniam testavimui surinkta baterijų spinta (3.2 paveikslėlis), kurioje sumontuota 84 vienetai 100Ah CALB LiFePO₄ celių nuosekliame jungime. Spintoje sumontuotas CAN bus duomenų protokolu valdomas vienfazis 3.3 kW įkrovėjas. Baterijų spintos celės 2 metus buvo sandėliuojamos, todėl po blokų surinkimo pastebėtas nemažas įtampų išsibarstymas. Atliktas pirminis priverstinis balansavimas iki žemiausią įtampą turinčios celės įtampos.



3.2 pav. Baterijų spinta.

Tolimesnis sistemos testavimas bus atliekamas hibridiniame IVECO Daily mikroautobuse. Mikroautobuse sumontuotas baterijų blokas turintis 84 vienetus teoriniame modeliavime aprašytų CALB 72 Ah LiFePO₄ celių. Valdymo ir galios grandinės išlieka tokios pat kaip baterijų spintoje, todėl kai kurie eksperimentiniai tyrimai galioja abiem sistemoms ir atliekami tik vienoje iš jų. 3.3 paveikslėlyje pateikiamas į mikroautobusus montuojamos baterijų dėžės vaizdas.



3.3 pav. Baterijų blokas.

3.1. Baterijų bloko celių įtampos matavimo tyrimas

Kiekvienos celės esančios baterijų spintoje įtampa išvedama per UART komunikaciją diagnostiniais tikslais į išorinį atvaizdavimo įrenginį, kuris bandymų metu buvo kompiuteris. Duomenys atnaujinami kas 5 sekundes 115200 baud greičiu. Žemiau 3.1.1 paveikslėlyje pateikiamas duomenų gaunamų per UART vaizdas.

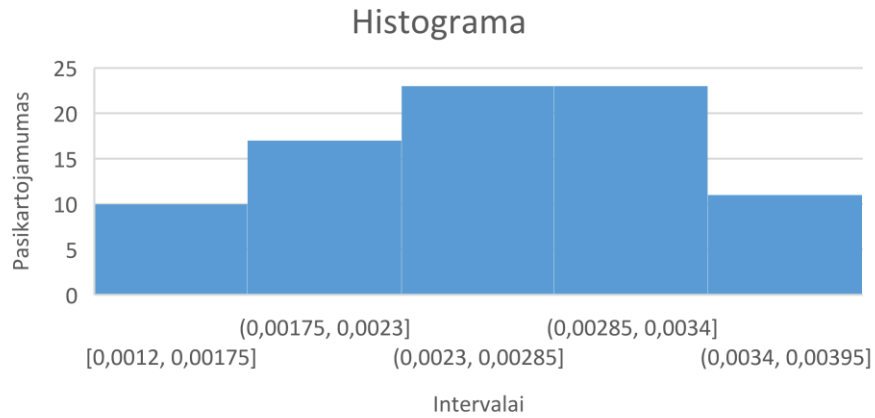
```
-----  
--- Live modules: 7 --- Live cells: 84 ---  
--- Total Voltage BMS:282.977V  
--- Total Voltage VBAT:282.625V  
--- Current LOW:0.785A --- Current HIGH:0.443A  
--- Min:3.355V --- Max:3.373V --- Avg:3.369V ---  
----- Cells -----  
[001]:3.368V [002]:3.367V [003]:3.369V [004]:3.371V [005]:3.369V [006]:3.369V  
[007]:3.368V [008]:3.368V [009]:3.369V [010]:3.372V [011]:3.368V [012]:3.368V  
[013]:3.366V [014]:3.368V [015]:3.371V [016]:3.371V [017]:3.368V [018]:3.368V  
[019]:3.368V [020]:3.367V [021]:3.369V [022]:3.372V [023]:3.369V [024]:3.368V  
[025]:3.366V [026]:3.366V [027]:3.366V [028]:3.369V [029]:3.365V [030]:3.370V  
[031]:3.367V [032]:3.365V [033]:3.365V [034]:3.368V [035]:3.367V [036]:3.368V  
[037]:3.369V [038]:3.371V [039]:3.356V [040]:3.362V [041]:3.372V [042]:3.372V  
[043]:3.370V [044]:3.369V [045]:3.361V [046]:3.364V [047]:3.370V [048]:3.369V  
[049]:3.368V [050]:3.370V [051]:3.371V [052]:3.372V [053]:3.370V [054]:3.370V  
[055]:3.369V [056]:3.369V [057]:3.371V [058]:3.373V [059]:3.372V [060]:3.368V  
[061]:3.368V [062]:3.369V [063]:3.369V [064]:3.372V [065]:3.373V [066]:3.371V  
[067]:3.367V [068]:3.370V [069]:3.369V [070]:3.374V [071]:3.372V [072]:3.369V  
[073]:3.370V [074]:3.370V [075]:3.369V [076]:3.372V [077]:3.371V [078]:3.370V  
[079]:3.372V [080]:3.370V [081]:3.370V [082]:3.374V [083]:3.373V [084]:3.370V  
-----
```

3.1.1 pav. Duomenų fragmentas.

Atliktas matavimo tikslumo įvertinimas naudojantis Metrel MD 9060 multimetru. Gamintojo specifikuojamas $\pm 0.02\%$ tikslumas iki 5 V matavimo diapazone [32]. Testavimo metu celių duomenys nuskaityti BMS sistema, vėliau individualiai kiekvienos celės įtampa išmatuota multimetru, palyginimo duomenys pateikiami žemiau. LTC6811 techniniame aprašyme deklaruojama ± 1.2 mV absoliuti matavimo paklaida iki 5V matavimo diapazone, kas sudaro ± 0.024 % paklaidą. Įvertinant tai, kad atraminis matavimo prietaisas yra tikslesnis, statistiškai gautas skirtumas tarp išmatuotų verčių:

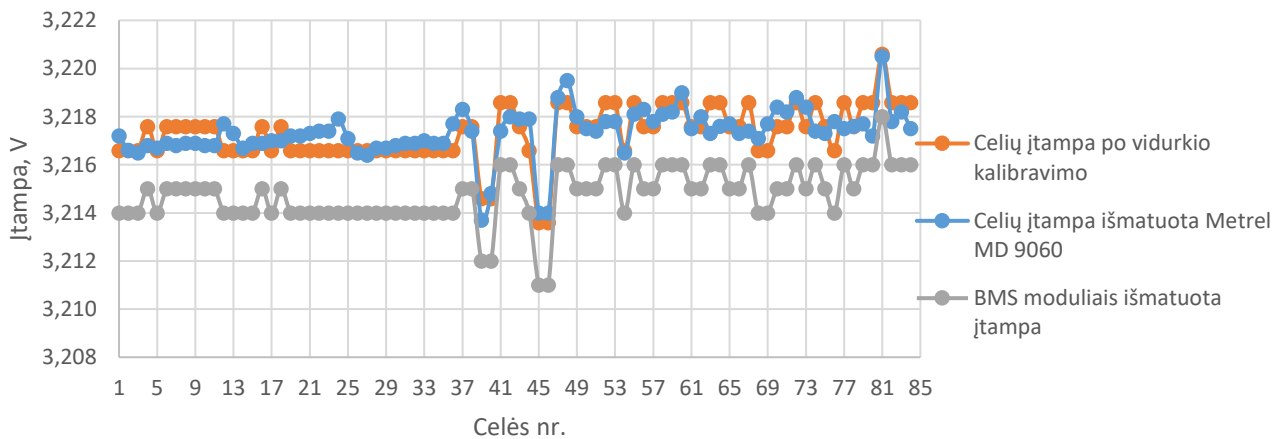
- Min 1.2 mV;
- Max 3.9mV;
- Vidurkis 2.58 mV.

Deklaruojamas ± 1.2 mV matavimo tikslumas gautiems rezultatams yra artimas, atsižvelgiant į tai, kad atraminis matavimo prietaisas ± 0.02 % tikslumo ir 4 skaičių po kablelio. Bandant įvertinti paklaidos kilmę nubraižyta įtampų skirtumų tarp BMS moduliais išmatuotų verčių ir multimetru išmatuotų įtampų verčių histograma. 3.1.2 paveikslėlyje matoma Histograma. Rezultatai rodo, kad didžioji dalis imties rezultatų pasiskirstę apie vidurkį, todėl galima manyti, kad paklaida yra sisteminė, ir ją galima dalinai sumažinti, kompensuojant skirtumą.



3.1.2pav. Įtampų skirtumų histograma.

Matavimo rezultatai pateikiami 3.1.3 paveikslėlyje. Oranžine spalva atvaizduota celių įtampa įvedus nuokrypio vidurkio korekciją. Matomas neženklaus įtampų išsibarstymas, kurio amplitudė telpa į gamintojo deklaruojamos paklaidos ribas.



3.1.3 pav. Celių įtampų palyginimas.

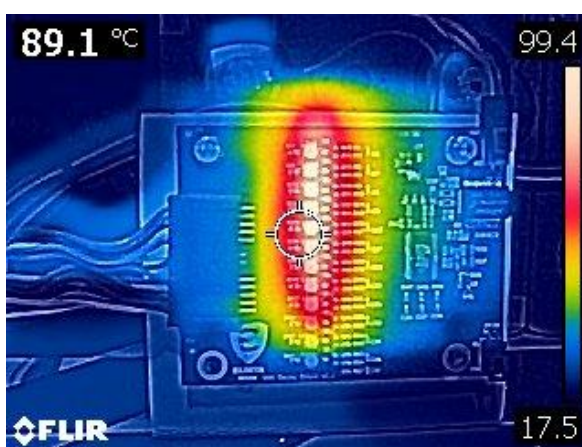
Tikslus celių įtampos matavimas yra svarbus norint užtikrinti patikimą ir efektyvų baterijų bloko veikimą. Palyginimui galima grubiai įvertinti, koks teoriškas energijos kiekis prarandamas esant 3 mV įtampos trūkumui baterijų bloke. Dirbant plokščiajame įtampos kreivės diapazone 3 mV įtampos pokytis sudaro apie 0.4 Ah pokytį 100 Ah celėje.

3.2. Baterijų bloko celių balansavimo tyrimas

Baterijų bloko celių įtampa įkrovimo metu ne visada kyla vienodu greičiu, kai kurios celės dėl senėjimo praranda nevienodą dalį talpos, tuo pačiu vidinė varža taip pat kinta nevienodai. Savaiminis išsikrovimas priklausomai nuo celės susidėvėjimo taip pat nevienodas. Baterijų bloko įkrovimo metu atliekamas viršutinis balansavimas, t.y. visos celės įkraunamos iki maksimalios leidžiamos įtampos, kuri LiFePo₄ celėms yra 3.6V. Įkrovimo metu mažesnę talpą turinčios celės

šià įtampà pasiekia greičiau nei kitos bloke esančios celės, todėl norint neperkrauti celės įtampos kilimas šuntuojamas balansavimo srove.

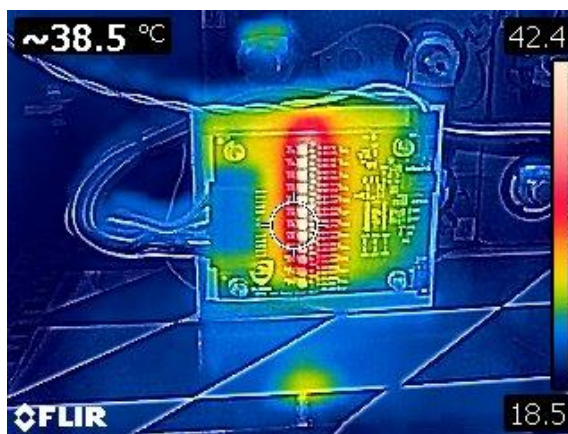
Suprojektuotoje sistemoje panaudotos 33 Ω balansavimo rezistoriai, kurie priklausomai nuo celės įtampos ją šuntuoja 105 – 110 mA srove. Kiekvienas BMS modulis gali balansuoti iki 12 celių, tuo pačiu celių šuntavimas pradamas nuo 3.45 V iki 3.65 V, jei pasitaikytų taip, kad visos celės aptarnaujamos BMS modulio turi būti šuntuojamos, PCB paviršiuje būtų išskaidoma apie 4.8W į šilumą. Tai pakankamai didelis kiekis galios atsižvelgiant į PCB matmenis (87x68 mm 1.6mm FR4). Todėl reikia tinkamai įvertinti šilumos nuvedimą PCB plokštėje. Be priverstinio aušinimo kai įjungtas 12 celių šuntavimas (įtampa apie 3.23 V) PCB paviršius pasiekia 100 °C esant 18 °C aplinkos temperatūrai. PCB išskaidydama 4 W galios savo temperatūra pakelia per 82 °C. PCB temperatūros vaizdas iš termovizoriaus pateiktas 3.2.1 paveikslėlyje.



3.2.1 pav. 12 celių balansavimas, pasyvus PCB aušinimas.

SMD rezistoriams kurių paviršiaus temperatūra viršija 70 °C rekomenduojama sumažinti maksimalios išskaidomos galios ribà. Šiuo atveju naudojami 2512 korpuso SMD rezistoriai, kurių maksimali išskaidoma deklaruojama galia prie 70 °C negali viršyti 2W [33] esant 100 °C temperatūrai rezistorius galės išskaidyti 60% maksimalios galios. Įvertinus faktà, kad šiltuoju sezonu baterijų dėžės viduje aplinkos temperatūra gali siekti apie 50 °C, tuomet PCB temperatūra gali pakilti iki 130 °C. Esant 130 °C temperatūrai rezistorius gali išskaidyti tik 30 % maksimalios galios, arba 0.6 W. Balansuojant 1 celę išskaidoma iki 0.4 W per rezistorių. Siekiant rezistorių ilgaamžiškumo padidinimo nerekomenduojama dirbti arti maksimalios galimos galios ribos.

Panaudojus šilumą nunešančius metalinius PCB laikiklius ir dielektrinius termolaidininkus galima ženkliai sumažinti PCB temperatūrą. PCB temperatūros vaizdas iš termovizoriaus pateiktas 3.2.2 paveikslėlyje. Matome, kad temperatūra PCB paviršiuje išskaidant 4W galios pakilo per 24 °C virš aplinkos temperatūros.



3.2.2 pav. 12 celių balansavimas, priverstinis PCB aušinimas.

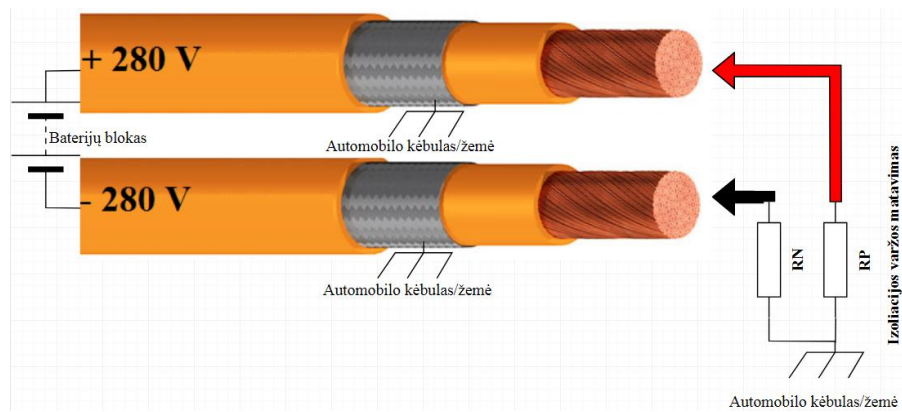
Didelės balansavimo srovės ($< 0.5 \text{ A}$) leidžia daug greičiau subalansuoti baterijų bloką, tačiau tai nėra reikalinga, jei balansavimas atliekamas ne tik krovimo metu, bet ir kai baterijų blokas būna ramybės būsenoje. Didelės ($< 0.5 \text{ A}$) balansavimo srovės reikalingos tuo atveju jei baterijų blokas smarkiai degradavęs ir jame yra celių su ženkliai sumažėjusia talpa. Baterijų bloko įkrovimo metu mažesnę talpą turinčios celės įsikrauna greičiau, nei talpos nepraradusios celės.

Projektuojamoje sistemoje baterijų blokas kraunamas 9 A srove, žemiausią talpą turinčiai celei pasiekus maksimalią įkrovimo įtampą 3.6 V celė yra šuntuojama balansavimo srove, tuo pačiu įkrovimo srovė sumažinama iki 0.1 A (lygi balansavimo srovei). Jei žemiausią ir didžiausią talpą turinčios 100 Ah celės talpos skirtumas lygus 5% , skirtumą pavertus Ah gauname apie 5 Ah skirtumą. Kraunant 0.1 A srove balansavimas užtruktų apie 50 h . Padidinus balansavimo srovę iki 0.5 A balansavimas įvyktų per apytiksliai 10 h .

3.3. Baterijų bloko izoliacijos varžos matavimo tyrimas

Izoliacijos varžos sumažėjimas dažniausiai sukeliamas patekus drėgmei į laidų sujungimo vietas, fiziškai pažeidus galios kabelius, ar sugedus elektronikos įrengimams, kurie turi tam tikrą izoliavimą elektromobilio kėbulo atžvilgiu.

Izoliacijos varžos matavimo bandymas atliekamas laboratorinėmis sąlygomis, todėl realaus nuotėkio sistemoje nėra. Norint ištestuoti sistemos veikimą atliekamas priverstinis varžos įterpimas. Priklausomai nuo gedimo tipo, galimas teigiamo laidininko srovės nuotėkis į korpusą, neigiamo laidininko nuotėkis į korpusą, arba abiejų laidininkų nuotėkis. Struktūrinis bandymo vaizdas pateiktas 3.3.1 paveikslėlyje.



3.3.1 pav. Nuotėkio varžos įterpimas.

Rezistorių realios varžos vertės išmatuojamos METREL EUROTTEST 61557 matuokliu [34] ir laikomos kaip atraminės tikrosios vertės. Matuoklis nustatomas į izoliacijos varžos matavimo režimą su 500 V testavimo įtampa. Deklaruojamas $\pm 2\%$ tikslumas matuojant iki 200 M Ω ribose. 3.3.1 lentelėje pateikiami gauti matavimo rezultatai.

3.3.1 lentelė. Izoliacijos varžos matavimo bandymai.

| Prijungta prie | Rezistorius | EUROTTEST 61557 parodymai | Izoliacijos varžos matuoklio parodymai RP | Izoliacijos varžos matuoklio parodymai RN | Nuokrypis nuo atraminio matuoklio,% |
|----------------|---------------------|---------------------------|---|---|-------------------------------------|
| neprijungta | $\infty\Omega$ | --- | 3,494 M Ω | 3,015 M Ω | --- |
| RP | 1 M Ω +-5% | 0,987 M Ω | 1,02 M Ω | 7,8 M Ω | -3,34% |
| RN | 560 k Ω +-5% | 556 k Ω | 8,3 M Ω | 565,1 k Ω | -1,6% |
| RP | 357 k Ω +-5% | 360 k Ω | 9,23 M Ω | 362,1 k Ω | -0,5% |
| RN | 120 k Ω +-5% | 125 k Ω | 8,3 M Ω | 129 k Ω | -3,1% |
| RP | 47 k Ω +-5% | 49,2 k Ω | 48,9 k Ω | 7,4 M Ω | 0,6% |
| RN | 26 k Ω +-5% | 25,7k Ω | 7,1 M Ω | 24,8 k Ω | 3,5% |
| RP | 10 k Ω +-5% | 9,8 k Ω | 9,6 k Ω | 6,4 M Ω | 2,0% |
| RN | 4,7 k Ω +-5% | 4,65 k Ω | 6,1 M Ω | 4,57 k Ω | 1,7% |
| RP | 0 | --- | 3,2 Ω | 4,2 M Ω | --- |

Bandymų metu išmatuoti imituoto izoliacijos varžos pokyčiai į sistemą įterpiant parazitinius rezistorius. Kadangi atraminis matavimo prietaisas sukurtas būtent izoliacijos varžos matavimui ir gali būti sertifikuojamas izoliacijos varžos matavimo bandymams atlikti, galima teigti kad jis yra tikslesnės klasės nei sukurtas izoliacijos varžos matuoklis. Remiantis tokia prielaida galima teigti, kad gautas matavimo rezultatų nuokrypis neviršija $\pm 4\%$ nuo atraminio matavimo prietaiso ir sukurto matavimo prietaiso tikslumas yra pakankamas taikomai užduočiai.

Matoma, kad nuokrypis nuo atraminio prietaiso yra labiau atsitiktinis ir sistemiškai sunkiai įvertinamas. Izoliacijos varžai mažėjant iš neigiamo nuokrypio pereinama prie teigiamo. Bandymų metu sistema buvo įkrauta iki 270 V, remiantis 100 elektromobilių saugos taisykle izoliacijos varža nuolatinei įtampai tokiu atveju turėtų būti didesnė nei 135 k Ω . Sėkmingai pavyko pamatuoti tiek didesnę (1 M Ω), tiek mažesnę (4,65 k Ω) varžas.

Sistemos veikimui reikalingas tik izoliacijos varžos nuotėkio aptikimas, tačiau matavimas plačiame diapazone gali padėti nuspėti gedimo atvejį. Jei izoliacijos varža tendencingai mažėja, galima iššaukti servizo pareikalavimą, kas leistų išvengti didesnių gedimų, išsprendus problemą jai dar nespėjus atsirasti. Aukštos įtampos nuotėkis į elektromobilio korpusą taip pat pavojingas ir žmogaus sveikatai, todėl ankstyvas problemos aptikimas gali sumažinti sveikatos sužalojimo riziką.

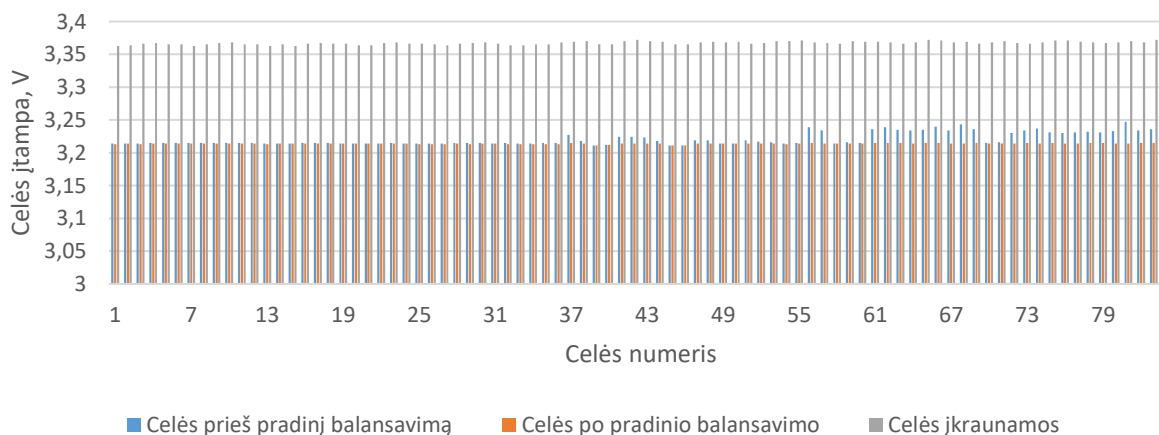
3.4. Baterijų bloko įkrovos lygio tyrimas

Baterijų spintoje esančios celės yra panaudotos ir jų būklė nėra aiški, be to celės apie 2 metus buvo sandėliuojamos. Todėl prieš įkoro pradžią visos buvo priverstinai šuntuotos iki žemiausią įtampą turinčios celės vertės (3,211 V). Prieš balansavimą pastebimas 36 mV įtampų skirtumas tarp didžiausią ir mažiausią įtampą turinčių celių. Po priverstinio balansavimo įtampų skirtumas sumažinamas iki 4 mV. Celių įkrovimo metu įtampų skirtumas padidėja iki 9 mV, kas rodo, kad celių nusidėvėjimas nėra vienodas, kai kurios celės turi mažesnę talpą, arba didesnę vidinę varžą, kas veda prie greitesnio įtampos augimo. 3.4.1 lentelėje pateikiami įtampų duomenys.

3.4.1 lentelė. Baterijų bloko celių įtampos.

| | Prieš pradinį balansavimą | Po pradinio balansavimo | Celių įkrovimo metu |
|---------------|---------------------------|-------------------------|---------------------|
| Min | 3,211 V | 3,211 V | 3,363 V |
| Max | 3,247 V | 3,215 V | 3,372 V |
| Vidurkis | 3,221 V | 3,213 V | 3,367 V |
| Išsibarstymas | 0,036 V | 0,004 V | 0,009 V |

3.4.1 paveikslėlyje pateikiamas visų bloką sudarančių celių įtampų vaizdas prieš balansavimą, po balansavimo ir įkrovimo metu. Bandymo metu baterijų spintos celės buvo įkraunamos 2 A srove.



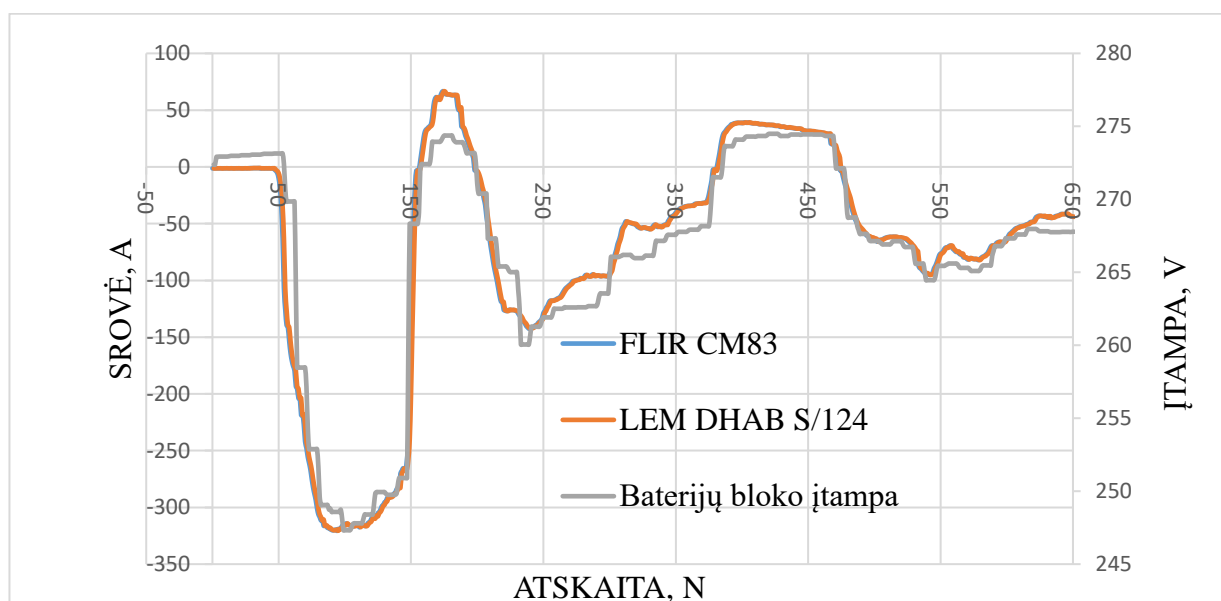
3.4.1 pav. Baterijų bloko celių įtampos.

Baterijų blokas su 100 Ah LiFePO4 celėmis įkrautas iki 3,213 V turi apie 35 % įkrovos. Norint baterijų blokui suteikti 100 % įkrovą reikėtų papildomai įkrauti 65 Ah talpos. Pilnai įkrauti celes 2 A srove turėtų užtrukti apie 33 valandas neįskaitant balansavimo trukmės.

3.5. Srovės matavimo tyrimas

Laboratorinėmis sąlygomis sudėtinga sugeneruoti pakankamai dideles sroves, kurios padengtų didžiąją dalį srovės sensoriaus matavimo diapazono. Todėl tolimesnis srovės matavimo tyrimas atliekamas elektromobilyje. Atraminis srovės matuoklis bandymo metu FLIR CM83 srovės replės su duomenų siuntimo funkcija [35]. Gamintojo deklaruojamas $\pm 2\%$ tikslumas iki 600 A srovės matavimo diapazone. Srovės sensoriaus duomenys iš baterijų bloko siunčiami CAN protokolu. Tyrimo metu automobilis stovi vietoje, staigiai greitėja, stabdo varikliu, vėliau žingsniai pakartojami. Automobiliui stovint vietoje srovės sąnaudos svyruoja nuo -1A iki -2.1 A priklausomai nuo automobilio žemos įtampos grandinių sukuriamos apkrovos DC-DC keitikliui. Esant didžiausiai apkrovai pasiekta -320 A iškrovos srovė iš baterijų dėžės, stabdant varikliu pasiekta +66 A įkrovimo srovė .

3.5.1 paveikslėlyje pateikiamas srovės kitimo grafikas važiuojant elektromobiliu. Grafike mėlyna spalva pateiktos srovės vertės iš FLIR CM83 srovės replių, oranžine spalva- srovė išmatuota baterijų dėžėje esančiu srovės sensoriumi. Apskaičiuotas nuokrypis nuo srovės replėmis išmatuotos srovės verčių svyruoja nuo -0.1 A iki +0.1 A, kadangi abiejų matavimo elementų tikslumo klasės artimos sudėtinga įvertinti baterijų bloko srovės sensoriaus tikslumą. Tačiau galima teigti, kad srovės matavimas visame diapazone yra pakankamai tikslus, kad būtų galima skaičiuoti baterijos SOC lygį, įvertinti elektromobilio energijos sąnaudas.



3.5.1 pav. Srovės ir įtampos kitimo grafikas.

Eksperimento pradžioje baterijų įtampa siekė 273 V, arba 3.25 V kiekvienai baterijų bloko celei. Esant 320 A srovei įtampa krenta iki 247 V, arba 2.94 V celei. Esant maksimaliai apkrovai baterijoje 0.31V įtampos kritimas prie 320 A, įtampos kritimą sukelia ne tik baterijos vidinė varža, bet ir baterijos sujungimo kontakto, bei varinės sujungimo šinos varža. Bendra celės ir jos kontakto varža esant 320 A apkrovai apytiksliai lygi 1 mΩ. Baterijų blokas surinktas iš visiškai naujų celių, kurių gamintojas deklaruoja <5 mΩ vidinę varžą. Gauti rezultatai rodo, kad baterijų bloko jungiamieji kontaktai yra kokybiški.

Stabdymo varikliu metu celių įtampa pakilo iki 274 V esant 66 A įkrovimo srovei. Būtina atsižvelgti į tai, kad stabdymas varikliu galimas tik tada, kai baterijų blokas nėra visiškai įkrautas, kitu atveju galimas celių perkrovimas.

3.6. Temperatūros matavimo tyrimas

Temperatūrų matavimas baterijų bloke atliekamas trijose mazguose; centrinis valdymo blokas (atraminis temperatūros matuoklis), baterijų bloko celėse, celių įtampos matavimo ir balansavimo moduliuose. Palyginamos baterijų bloko atskirų mazgų temperatūros baterijų blokui būnant ramybės būsenoje. Įkrovimo metu, balansavimo metu, iškrovimo metu. Temperatūros duomenys iš baterijų bloko perduodami CAN protokolu. Aplinkos temperatūra bandymo metu buvo lygi 18 °C įkrovimo ir balansavimo metu, iškrovimo metu 23 °C. Temperatūrų vertės nuskaitytos visų procesų pabaigoje, baigus įkrauti ir balansuoti, iškrovus baterijų bloką. Baterijų bloko įkrovimo srovė 7 A, balansavimo srovė 160 mA (su 22 Ω balansavimo rezistoriais). Iškrovimo srovė iki 320 A mišrus iškrovimo režimas važiuojant automobiliu, srovės vidurkis 70 A. 3.6.1 lentelėje pateikiami temperatūros matavimo rezultatai.

3.6.1 lentelė. Baterijų bloko temperatūros.

| Temperatūra | Ramybės būseną | Įkrovimas | Balansavimas | Iškrovimas |
|-------------------|----------------|-----------|--------------|------------|
| Centrinis modulis | 18.1 °C | 19.7 °C | 20.2 °C | 31.5 °C |
| 1 celių modulis | 19 °C | 22 °C | 43 °C | 35 °C |
| Celių grupė 1-6 | 18 °C | 21 °C | 22 °C | 35 °C |
| Celių grupė 6-12 | 18 °C | 21°C | 21°C | 36°C |
| 2 celių modulis | 18 °C | 21°C | 39 °C | 35°C |
| Celių grupė 1-6 | 18 °C | 21 °C | 22 °C | 36°C |
| Celių grupė 6-12 | 18 °C | 22°C | 21° C | 35° C |
| 3 celių modulis | 19 °C | 21 °C | 50 °C | 35 °C |
| Celių grupė 1-6 | 18 °C | 21 °C | 21 °C | 36 °C |
| Celių grupė 6-12 | 18 °C | 21°C | 21°C | 36°C |
| 4 celių modulis | 17 °C | 21 °C | 41 °C | 36°C |
| Celių grupė 1-6 | 18 °C | 22 °C | 22 °C | 35°C |
| Celių grupė 6-12 | 18 °C | 21 °C | 21 °C | 36 °C |

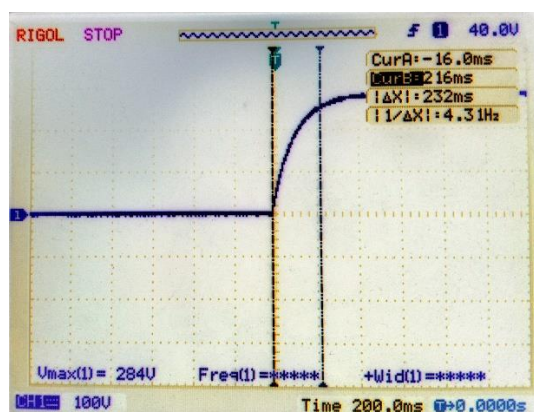
| | | | | |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| 5 celių modulis | 18 °C | 22 °C | 22 °C | 35 °C |
| Celių grupė 1-6 | 18 °C | 21 °C | 21 °C | 36 °C |
| Celių grupė 6-12 | 18 °C | 21 °C | 21 °C | 35°C |
| 6 celių modulis | 18 °C | 22 °C | 46 °C | 36 °C |
| Celių grupė 1-6 | 18 °C | 21 °C | 21 °C | 35°C |
| Celių grupė 6-12 | 19 °C | 21 °C | 21 °C | 35 °C |
| 7 celių modulis | 18 °C | 22 °C | 52 °C | 36 °C |
| Celių grupė 1-6 | 17 °C | 22 °C | 22 °C | 36 °C |
| Celių grupė 6-12 | 18 °C | 21 °C | 21 °C | 35 °C |
| Aplinkos temperatūra | 18° C | | | 23 °C |

Apžvelgus duomenis matyti, kad labiausiai kaista baterijų bloko celių balansavimo moduliai. Kaitimą lemia balansavimo metu išsiskiriantis didelis šilumos kiekis. Kadangi moduliai maži, sugeneruotas šilumos kiekis bendrą baterijų bloko temperatūrą padidina neženkliai. Įkrovimo metu esant 7 A įkrovimo srovei baterijų blokas sušilo vidutiniškai 3 °C virš aplinkos temperatūros. Iškrovimo metu baterijų blokas sušilo vidutiniškai 13 °C virš aplinkos temperatūros. Centrinis valdymo blokas atspindi baterijų bloke esančio oro temperatūrą, kuri neženkliai pakyla nuo aplinkos temperatūros.

Gamintojas deklaruoja -22 °C ~ 55 °C iškrovimo temperatūros diapazonas. Baterijų blokas visada montuojamas mikroautobuso dugne, todėl tiesioginių saulės spindulių negauna. Aplinkos temperatūra apsprendžia baterijų bloko ramybės būsenos temperatūrą. Iškrovimo metu baterijų bloko temperatūra pakyla iki 13 °C, todėl galima teigti, kad baterijų bloką be papildomo aušinimo galima naudoti iki 40 °C aplinkos temperatūroje.

3.7. Sistemos minkšto paleidimo ir kontaktorių valdymo tyrimas

Baterijų blokas prie sistemos prijungiamas galios kontaktoriais. Sistemą sudarančių komponentų grandinės dažniausiai sumontuoti didelės talpos galios kondensatoriai. Jų įkrovimas vykdomas minkšto paleidimo metu. 3.7.1 paveikslėlyje pateiktas sistemos minkšto paleidimo įtampos augimo vaizdas išmatuotas oscilografu.



3.7.1 pav. Įtampos kitimo grafikas.

Projektinėje dalyje buvo sumodeliuotas sistemos minkštas paleidimas, kuris užtruko 500 ms (5τ), bandymų metu įkrovimas užtruko apie 450 ms. Įkrovimo trukmės svyravimas galimas dėl skirtingų baterijų bloko įtampų bandymo ir modeliavimo metu, taip pat dėl kondensatoriaus parametrų tolerancijos. Norint pagreitinti sistemos paleidimo trukmę, galima sumažinti minkšto paleidimo rezistoriaus varžą, tačiau toks būdas nėra rekomenduojamas dėl didėjančios paleidimo srovės, kuri sukels greitesnį minkšto paleidimo kontaktoriaus susidėvėjimą. Kitas būdas minkšto paleidimo trukmę mažinti iki 3τ , taip kondensatorius bus beveik įkrautas iki darbinės įtampos. Minimalus įtampos skirtumas galios kontaktoriams nesukels didelės jungimo srovės, kuri būtų gaunama be minkšto paleidimo.

Sistemos aptarnavimo atjungėjas ir aukštos įtampos galios jungtis (3.7.2 paveikslėlis) taip pat atlieka kontaktorių valdymą. Atjungiant aukštos nuolatinės įtampos apkrovas galimas elektros lanko atsiradimas. Servizo atjungėjas ir galios jungtis suprojektuoti taip, kad sujungimą indikuojantis kontaktas atsijungtų pirmiau nei galios kontaktas. Tokiu būdu sistema žino kada atjungti galios kontaktorius, kad apsaugoti baterijų bloką atjungiantį asmenį nuo galimo elektros lanko išlydžio, ar tiesioginio prisilietimo prie aukštą įtampos potencialą turinčio kontakto.



3.7.2 pav. Sistemos aptarnavimo atjungėjas ir aukštos įtampos galios jungtis.

Jeigu prie baterijų bloko neprijungtas servizo atjungėjas ar aukštos įtampos galios jungtis, galios kontaktoriai negali būti sujungti. Bandymo metu buvo bandyta, kaip įmanoma greičiau atjungti galios jungtį, bandant priesti prie galios kontakto, kuris vis dar turėtų baterijų bloko įtampą (280 V). Žmogaus ranka nebuvo įmanoma taip greitai atjungti kabelio, kad nespėtų išsijungti galios kontaktoriai.

IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

1. Atlikus rinkoje esančių elektromobilių baterijų blokų struktūros analizę pastebėti tendencingi panašumai. Baterijų blokai valdomi centriniu moduliu, o baterijų bloko celių įtampos ir temperatūros yra nuskaitomos atskirais moduliais, kuriais atliekamas ir balansavimas. Dažniausiai sutinkamos SPI komunikacijos atmainos. Vadovaujantis elektromobilių saugos taisyklėmis yra privalomas baterijų bloko izoliacijos varžos matavimas.
2. Rinkoje esantys BMS IG savo funkcionalumu yra gana panašūs, tačiau ne visi palaiko didesnę nei 6 celių skaičių. Taip pat ne visi turi galimybę sujungti daugiau nei vieną IG nuosekliai. Atlikus kainos ir funkcionalumo analizę, pasirinktas tinkamiausias BMS IG – LTC6811, palaiko iki 12 celių įtampos ir temperatūros matavimus, įtampų balansavimą. Atitinka ISO26262 keliamus reikalavimus.
3. Modeliavimo metu atliktas baterijų bloke esančių CALB 72 Ah LiFePO₄ celių iškrovimo ir įkrovimo ciklų generavimas. Gauti duomenys parodė, kad būtina laikytis baterijų gamintojo nurodytos temperatūros režimo. Esant 0 °C temperatūrai 72 Ah baterijų blokas praranda tik 1.2Ah, tuo tarpu -20 °C praranda 50 % deklaruojamos talpos. Eksploatuojant baterijas neigiamoje temperatūroje reikia mažinti SOC langą, papildomai šildyti baterijas. Prie baterijų bloko prijungiami didelės talpos kondensatoriai sukelia labai aukštą startinę srovę, todėl būtinas sistemos minkštas paleidimas.
4. Atsižvelgiant į teorijos analizę ir modeliavimo duomenis suprojektuojama baterijų bloko valdymo sistema. Suprojektuota sistema gali aptarnauti baterijų blokus su 12 arba $n \cdot 12$ celių. Gali matuoti baterijų įtampą nuo 1 V iki 5 V, temperatūrą nuo -50 °C iki 150 °C, srovę $< \pm 0.1$ A iki ± 500 A. Sistema gali įvertinti baterijų bloko izoliacijos varžą, valdyti galios kontaktorius, baterijų šildytuvą, komunikuoti su elektromobiliu CAN protokolu.
5. Eksperimentiniais tyrimais išsiaiškinta, kad LiFePO₄ baterijų iškrovimas ir įkrovimas galimas tik gamintojo nurodytomis sąlygomis. Bandymų metu išmatuota baterijų bloko celių vidinė varža buvo < 5 m Ω , tai atitinka gamintojo specifikacijas. Srovės ir įtampos matavimai yra stabilūs ir tenkina reikalaujamus tikslumus, kad būtų galima kokybiškai įvertinti baterijos būklę. Realizuotos izoliacijos varžos matavimo grandinės tenkina elektromobilių saugos taisyklės Nr. 100 reikalavimus. Pagamintas veikiantis baterijų blokas, kuris sėkmingai ir be jokių trikdžių eksploatuojamas hibridiniame mikroautobuse.

INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. Adam H. Putnam, Commissioner. Batteries for Vehicles. Florida Department of Agriculture and Consumer Services [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-10-16] Prieiga per: <http://www.myfloridahomeenergy.com/help/library/transportation/batteries-for-vehicles/#sthash.UzVPrS6U.dpbs>
2. System Solutions for Hybrid and Electric Vehicles. Texas Instruments in Automotive Applications [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-10-16] Prieiga per: <http://www.ti.com/lit/ug/szza058c/szza058c.pdf>
3. AEC-Q100 Failure Mechanism Based Stress Test Qualification for Integrated Circuits: Automotive Electronics Council [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-10-18] Prieiga per: http://www.aecouncil.com/Documents/AEC_Q100_Rev_G_Base_Document.pdf
4. P. Nelson, R. Vijayagopal, K. Gallagher, and A. Rousseau, “Sizing the battery power for PHEVs based on battery efficiency, cost and operational cost savings,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 6, no. 3, pp. 514–522, 2013.
5. S. Dhameja, *Electric Vehicle Batteries Systems*, no. Book. 2002.
6. I. Bloom, “Battery Testing and Life Estimation in the US,” pp. 1–26, 2011.
7. BU-107: Comparison Table of Secondary Batteries [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-10-16] Prieiga per: http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries
8. Benchmarking the Tesla Model S – A Tour of Ricardo Engineering’s Teardown Laboratory [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-10-16] Prieiga per: http://www.coppermotor.com/wp-content/uploads/2014/11/Tesla-Model-S-Battery-Pack-Ricardo-photo_1280.jpg
9. CALB EV Lithium LiFePO4 Prismatic Cell Batteries [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-10-16] Prieiga per: <http://www.electrincarpartscompany.com/70Ah-CALB-Battery>
10. Dissecting the Nissan LEAF battery [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-10-16] Prieiga per: <http://insideevs.com/dissecting-leaf-battery-wvideo/>
11. R. Ratz, “BMS System Benchmark and Standardization,” no. March, 2015 battery [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-10-16] Prieiga per: https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/4_Ricardo_BMS_systems_comparison_2014%20rev2.pdf
12. Y. Shi, K. Smith, R. Zane, and D. Anderson, “Life Prediction of Large Lithium-Ion Battery Packs with Active and Passive Balancing *,” pp. 1–6, 2017.
13. J. V. Barreras, C. Pinto, R. De Castro, E. Schaltz, S. J. Andreasen, and R. E. Araújo, “Multi-objective control of balancing systems for li-ion battery packs: A paradigm shift?,” *2014 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2014*, no. May 2015, 2014.

14. White Paper - How much balancing current do you need? [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-10-16] Prieiga per: http://liionbms.com/php/wp_balance_current.php.
15. R. Racz, C. Schott, and A. Manco, "Dual-Range Electrical Current Sensor," *Procedia Chem.*, vol. 1, no. 1, pp. 638–641, 2009.
16. W. Wenwei, L. Cheng, T. Peng, and Z. Chengjun, "Thermal Characteristic Analysis of Power Lithium-ion Battery System for Electric Vehicle," *2012 Third Int. Conf. Digit. Manuf. Autom.*, no. 2, pp. 967–971, 2012
17. Mitsubishi Outlander PHEV - Plug-in hybrid EV system [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-10-16] Prieiga per: <http://www.invetr.com/control-and-electronics/mitsubishi-outlander-phev>
18. W. Wenwei, L. Cheng, T. Peng, and Z. Chengjun, "Thermal Characteristic Analysis of Power Lithium-ion Battery System for Electric Vehicle," *2012 Third Int. Conf. Digit. Manuf. Autom.*, no. 2, pp. 967–971, 2012.
19. Battery Temperature Sensing [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-10-16] Prieiga per: <http://www.powerandsignal.com/images/pdfs/AASThermoBatteryTempSensorBrochure.pdf>
20. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train: E/ECE/324/Rev.2/Add.99/Rev.1-E/ECE/TRANS/505/Rev.2/ Add.99/Rev.1.- [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-10-16] Prieiga per:<https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/R100r1e.pdf>
21. LTC6804-1/LTC6804-2 1 Multicell Battery Monitors [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-10-16] Prieiga per:<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/680412fc.pdf>
22. ISO 26262-1:2011 Transporto priemonių funkcinis saugumas (ISO 26262-1:2011) Road vehicles -- Functional safety -- Part 1: Vocabular (ISO 26262-1:2011)
23. S. S. Tikar, "Compliance of ISO 26262 Safety standard for Lithium ion battery and its battery management system in Hybrid Electric vehicle," 2017," *Transportation Electrification Conf.. Digit. Manuf. Autom.*, 2017
24. L135F72 metal series [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-10-16] Prieiga per: <http://en.calb.cn/product/show/?id-630>
25. ScanIt is a program for extracting data from scientific graphs, particularly from line and scatter plots [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-10-16] Prieiga per: <http://www.amsterchem.com>
26. The Battery block implements a generic dynamic model parameterized to represent most popular types of rechargeable batteries [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-10-16] Prieiga per: <https://se.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/battery.html#bry4req-11>
27. 12.8 V, 40 Ah, Lithium-Ion (LiFePO4) Battery Aging Model (1000 h Simulation) [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-10-16] Prieiga per: <https://www.mathworks.com/examples/>

- [simpower/mw/sps_product-power_battery_aging-12-8-v-40-ah-lithium-ion-lifepo4-battery-aging-model-1000-h-simulation?s_tid=examples_p1_BOTH%20-%203](http://www.linear.com/product/power_battery_aging-12-8-v-40-ah-lithium-ion-lifepo4-battery-aging-model-1000-h-simulation?s_tid=examples_p1_BOTH%20-%203)
28. Multicell Battery Stack Monitor [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-10-16] Prieiga per: <http://www.linear.com/purchase/LTC6811-1>;
 29. 500+ A 12-800VDC Contactor [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-10-16] Prieiga per: http://www.gigavac.com/sites/default/files/catalog/spec_sheet/gv200.pdf
 30. LEM dual range current sensor for EV [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-10-16] Prieiga per: www.lem.com/docs/products/dhab_s_124.pdf
 31. LM50-Q1 SOT-23 Single-Supply Centigrade Temperature Sensor [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-10-16] Prieiga per: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm50.pdf>
 32. METREL MD 9060 TRMS, 500.000 counts LCD, 100 kHz Voltage Bandwidth Heavy Duty Industrial Multimeter. – http://downloads.cdn.re-in.de/350000-374999/358517-an-01-ml-METREL_MD_9060_DIGITALMULTIMETER_M_de_en.pdf ;
 33. High Power Thick Film Chip Resistor. – <http://www.farnell.com/datasheets/1824479.pdf>;
 34. Eurotest 61557 MI 2086 User Manual. – https://www.metrel.si/fileadmin/BAZA_od_Damijan_Dolinar/Metrel/Navodila_instrumentov/Instruments/MI_2086_Eurotest_61557/Ang/MI_2086_Eurotest_ANG_Ver_4.2_20_750_719.pdf;
 35. True RMS Power Clamps [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-10-16] Prieiga per: <https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/flir-cm82-cm83-cm85-datasheet.pdf>











PRIEDAI

Priedas 1. Įkrovimo kabelių standartai, krovimo režimai

Elektromobilių baterijų krovimui naudojamos įkrovimo stotelės su žemiau nurodytais krovimo standartais 1.1 lentelė. Europoje dažniausiai sutinkamas IEC 62196 1, 2, 3, 4 krovimo režimas.

1.1 lentelė. Įkrovimo stotelių standartai

| Standartas | Šalis | Apibūdinimas |
|-----------------------|----------|---|
| IEC 62196 | ES | Naudojama 1, 2, 3, 4 krovimo režimais. |
| IEC 62196 Combo | ES | 200-450 V/DC 200-400 A greitasis krovimas |
| SAE J1772 | JAV | 120 V/AC 1 fazės krovimui, 12-16 A |
| SAE J1772 „Hibridinė“ | JAV | 200-450 V/DC 200-400 A greitasis krovimas |
| IEC 62196 | Kinija | 220 V/AC 1 fazės krovimui |
| IEC 62196 | Japonija | 220 V/AC 1 fazės krovimui |
| TEPCO-ChAdEMO | Japonija | 200-400 A greitasis krovimas |

| | JAV | ES | Kinija | Japonija |
|-------|--|--|--|--|
| AC |  SAE J1772 / IEC 62196-2 |  IEC 62196-2 |  GB Part 2 |  IEC 62196-2 |
| DC |  IEC 62196-3 |  IEC 62196-3 |  GB Part 3 / IEC 62196-3 |  CHAdEMO / IEC 62196-3 |
| COMBO |  SAE J1772 / IEC 62196-3 |  IEC 62196-3 | | |

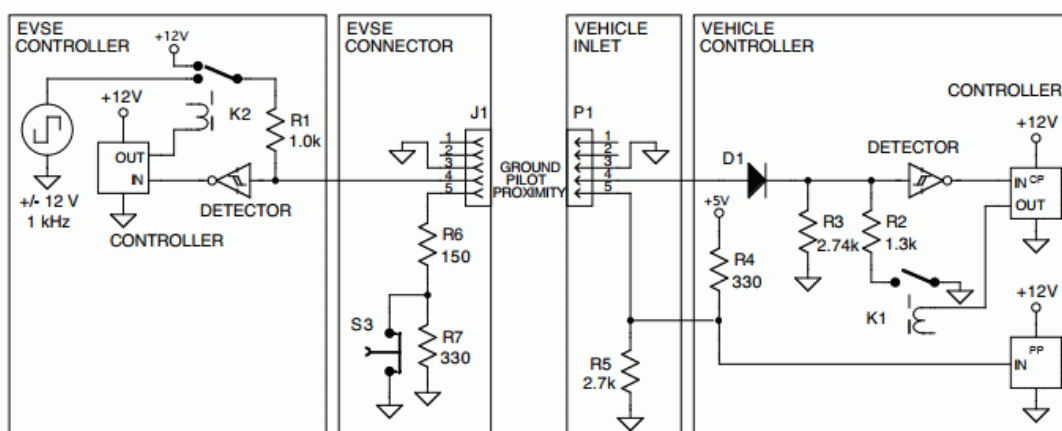
1.1 pav. Elektromobilio įkrovimo jungčių tipai .

Pirmi 3 režimai naudojami lėtam įkrovimui, ketvirtas greitajam įkrovimui.

- Mode 1 230V 16A 1 fazė iki 3kW galios krovimas (be įkrovimo kontrolės, automobilis visada prijungtas prie aukštos įtampos).
- Mode 2 230V 16A 1 fazė iki 3kW galios krovimas su įkrovimo valdymo bloku.
- Mode 3 230V 32A 1 fazė arba 400V 32A iki 43kW galios krovimas su įkrovimo valdymo bloku.
- Mode 4 400V 63A 3 fazės su AC-DC keitikliu >50kW.

Krovimo kabelio valdymas vykdomas remiantis SAE J1772-2001 standartu. Valdymo komunikacija tarp krovimo stotelės ir elektromobilio vyksta CP (*angl. control pilot*) ir PP (*angl. proximity pilot*) signalais, 1.2 paveikslėlis. PP linijos varža leidžia elektromobiliui atpažinti, kada prie jo prijungiamas krovimo kabelis. Esant $480\ \Omega$ varžai matomas krovimo lizde užfiksuotas kabelis, kai varža $150\ \Omega$ nuspaustas kabelio atrakinimo mygtukas, krovimas nutraukiamas. Elektromobiliui atpažinus krovimo kabelį krovimo sistema gali pakeisti atpažinimo varžą, kuri atitinkamai nurodo kokio galingumo krovimo kabelis pajungtas. Krovimo kabelio srovės parinkimo varžų vertės nurodytos 1.2 lentelėje.

CP linija pirminėje krovimo stadijoje (A) prijungiama prie +12 V šaltinio kroviklio dalyje, prijungus krovimo kabelį prie elektromobilio CP linija apkraunama $2740\ \Omega$ varža. Krovimo įtaisui aptikus $2740\ \Omega$ varžą, CP linija perjungiamą į kitą režimą (B), linija maitinama $1\text{kHz} \pm 12\text{ V}$ stačiakampių impulsų signalu. Priklausomai nuo CP linijos varžos galimas įprastas krovimas (C) arba krovimas su ventiliacija (D), jei tai leidžia krovimo stotelės aplinka. Maksimalios galimos krovimo srovės vertę krovimo stotelė taip pat perduoda keičiant CP linijos 1 kHz stačiakampio signalo impulso plotį. Atitinkamai 16 % skverbtis – 10 A, 25 % – 16 A, 50 % – 32A, 90 % – greitas krovimas.



1.2 pav. Elektromobilio krovimo kabelio atpažinimo grandinė.

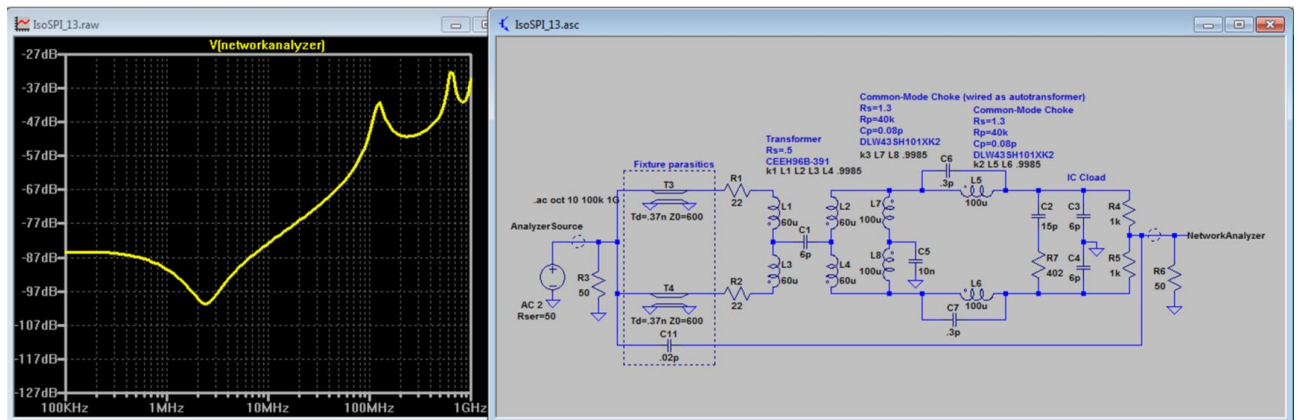
1.2 lentelė. Krovimo procesą keičiančios varžos

| PP-PE linijos varža | Maksimali srovė | CP-PE linijos varža | Būsena |
|---------------------|-----------------|---------------------|--|
| $\infty\ \Omega$ | 6 A | $\infty\ \Omega$ | A Elektromobilis neprijungtas |
| $1500\ \Omega$ | 13 A | $2740\ \Omega$ | B Elektromobilis prijungtas |
| $680\ \Omega$ | 20 A | $882\ \Omega$ | C Elektromobilis kraunamas |
| $220\ \Omega$ | 32 A | $246\ \Omega$ | D Elektromobilis kraunamas su ventiliacija |
| $100\ \Omega$ | 63 A | - | E Nėra maitinimo |
| $<100\ \Omega$ | 80 A | - | F Klaida |

Priedas 2. Izoliuojančių transformatorių modeliavimas LT Spice

Žemiau pateikiamas modeliavimo pavyzdys (2.1 paveikslėlis) su bendraašio induktoriaus ir transformatoriaus su papildomu induktoriumi, kurio sukuriamas virtualus induktyvinis centro taškas jungimu (*angl. CMC plus Transformer with Inductive Virtual Center-Tap*). Modeliavimas atliekamas remiantis suvedant komponentų techniniais duomenimis taip pat duomenų perdavimo linijos parazitiniiais ryšiais. Modeliuojamos transformatorių, kurios gamintojai rekomenduoja naudoti BMS sistemose perdavimo charakteristikos.

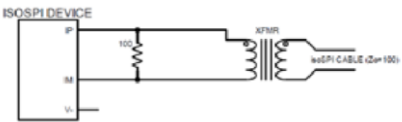
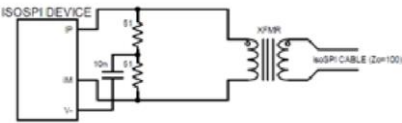
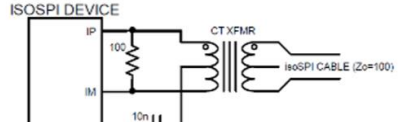
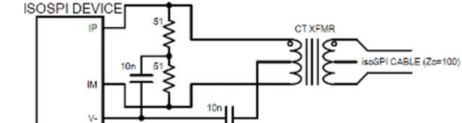
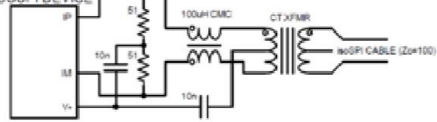
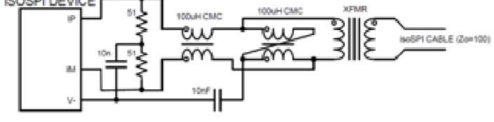
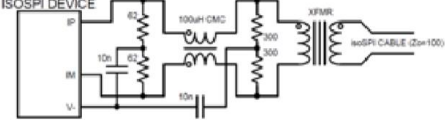
- Halo TG110-AE050N5LF;
- TDK ALT4532M-201;
- CEEH96B-391.



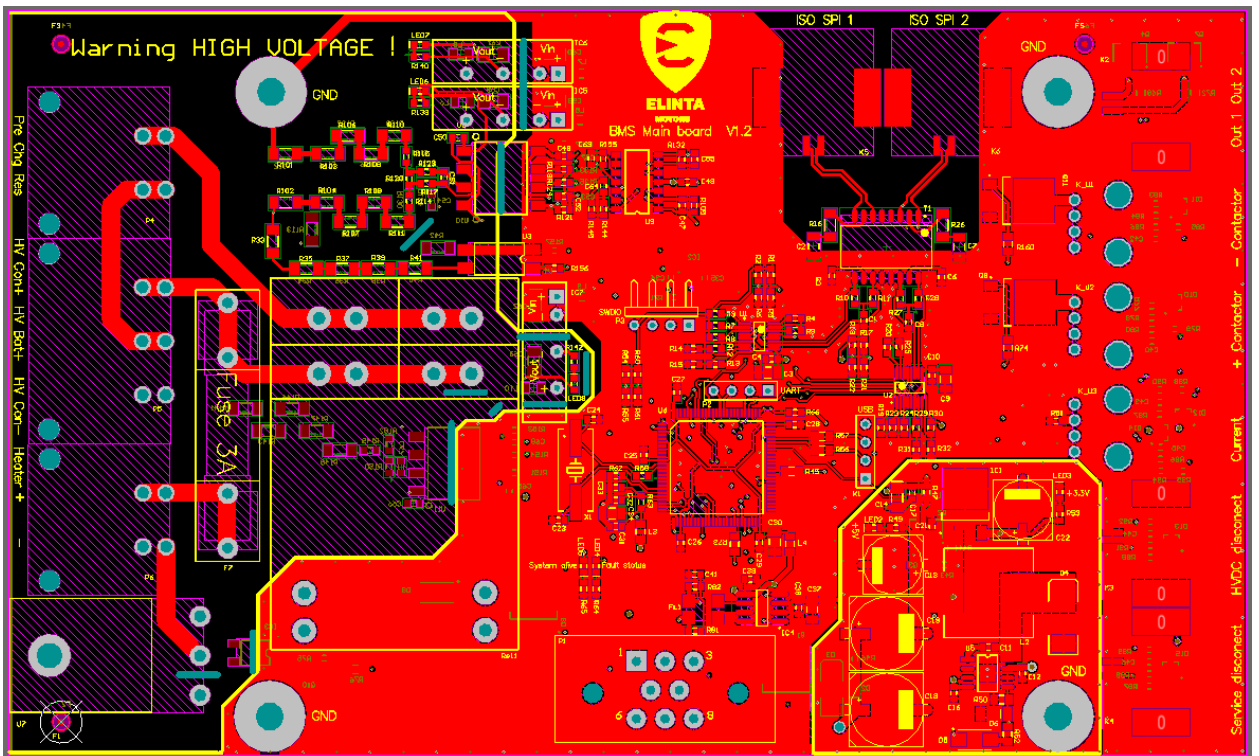
2.1 pav. Transformatoriaus perdavimo charakteristika.

Atlikus modeliavimą pasirinktas bendraašio triukšmo (*angl. Common Mode Rejection*) atmetimas prie 10 MHz dažnio, nes tai dominuojantis dažnis ISOspi duomenų perdavimo protokoluose. Priklausomai nuo transformatoriaus jungimo būdo galimi labai įvairūs CMR lygiai, kurie svyruoja nuo 6 dB iki 78 dB. 2.1 lentelėje pateikiami modeliavimo duomenys. Matome, kad tik transformatoriaus su 100ohm terminavimu prasčiausiai slopina bendraašius triukšmus. Virtualaus centro taško įnešimas kondensatoriumi CMR pagerina virš 20 dB. Transformatorius su vidurio tašku naudojimas CMR padidina dar apie 10 dB, tuo tarpu papildomai prijungtas CM induktorius CMR padidina papildomais 20 dB. Jungimo būdas su papildomais CM induktoriais iš kurių vienu sukuriamas virtualus induktyvinis centro taškas, o transformatorius neturi centrinio taško parodė geriausias rezultatus, kur CMR siekė 78 dB. Kadangi elektromobiliuose elektrinių triukšmų kiekis labai didelis pasirinkta didžiausią CMR parodęs jungimo būdas.

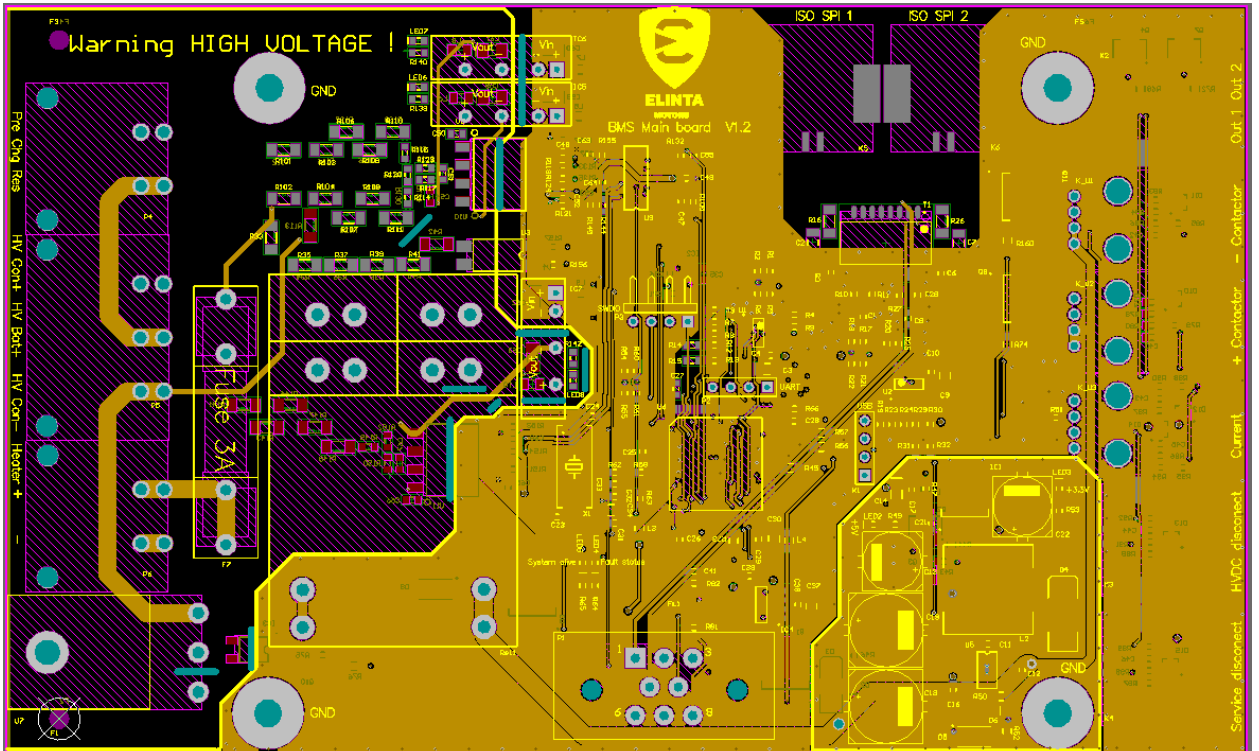
2.1 lentelė. Transformatorių CMR modeliavimas.

| Grandiné | Modelis | CMR ties 10 MHz |
|---|---------|-----------------|
|  | Halo | 12 |
| | TDK | 6 |
| | Sumida | 15 |
|  | Halo | 36 |
| | TDK | 27 |
| | Sumida | 39 |
|  | Halo | 37 |
| | TDK | 55 |
|  | TDK | 55 |
|  | Halo | 60 |
| | TDK | 75 |
|  | Sumida | 78 |
|  | Sumida | 70 |

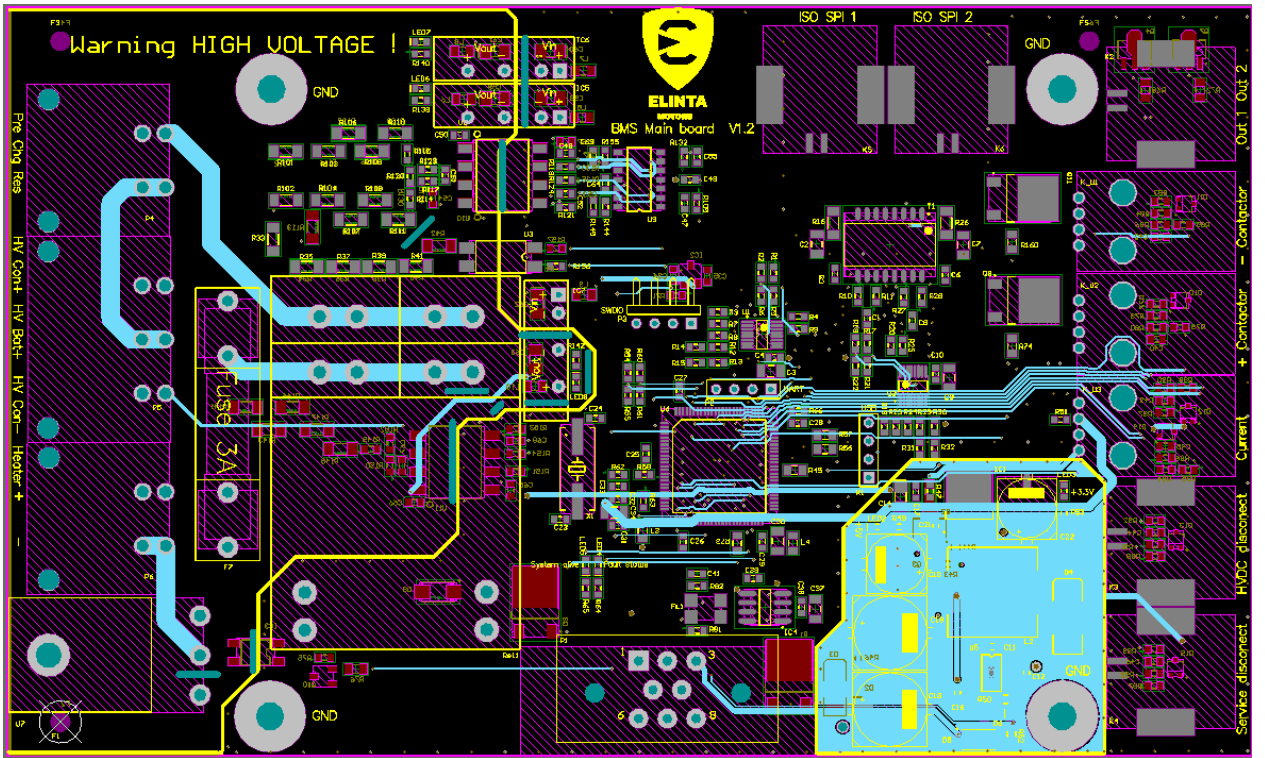
Priedas 3. PCB sluoksnių vaizdas



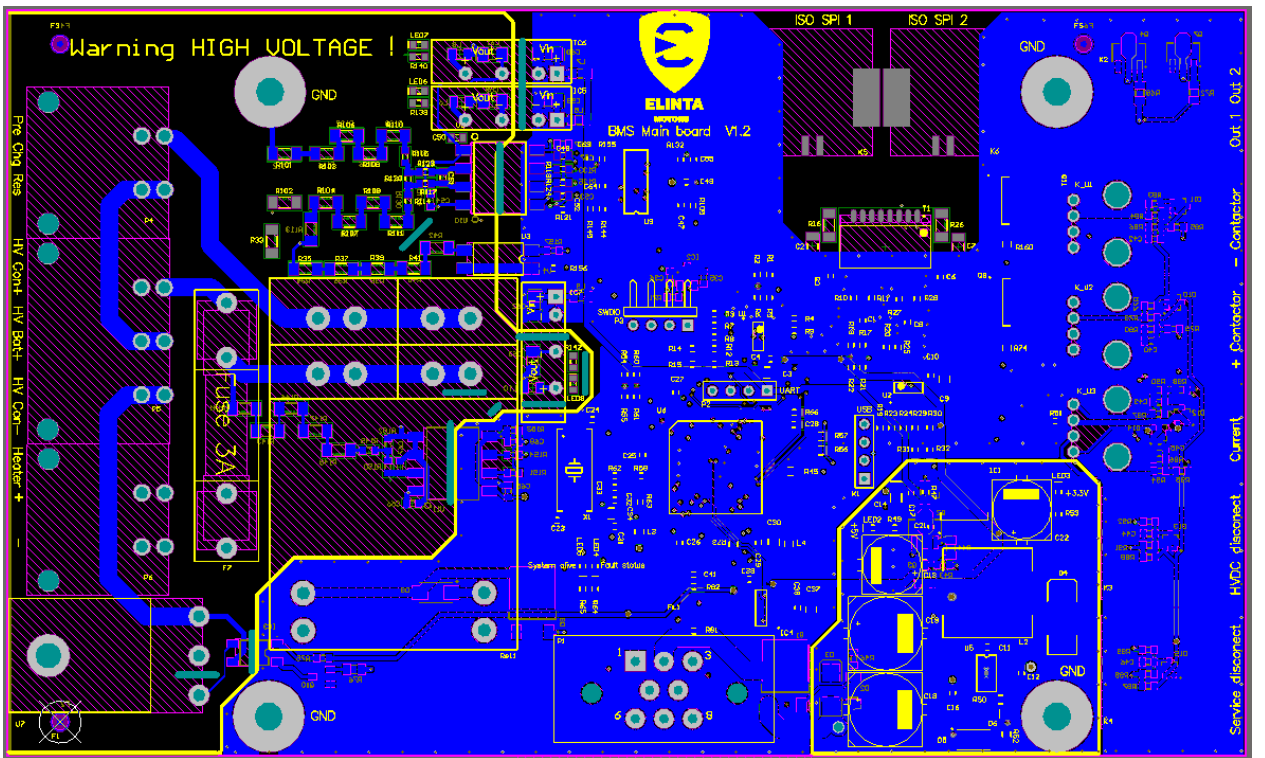
3.1 pav. Centrinės valdymo PCB viršutinis sluoksnis.



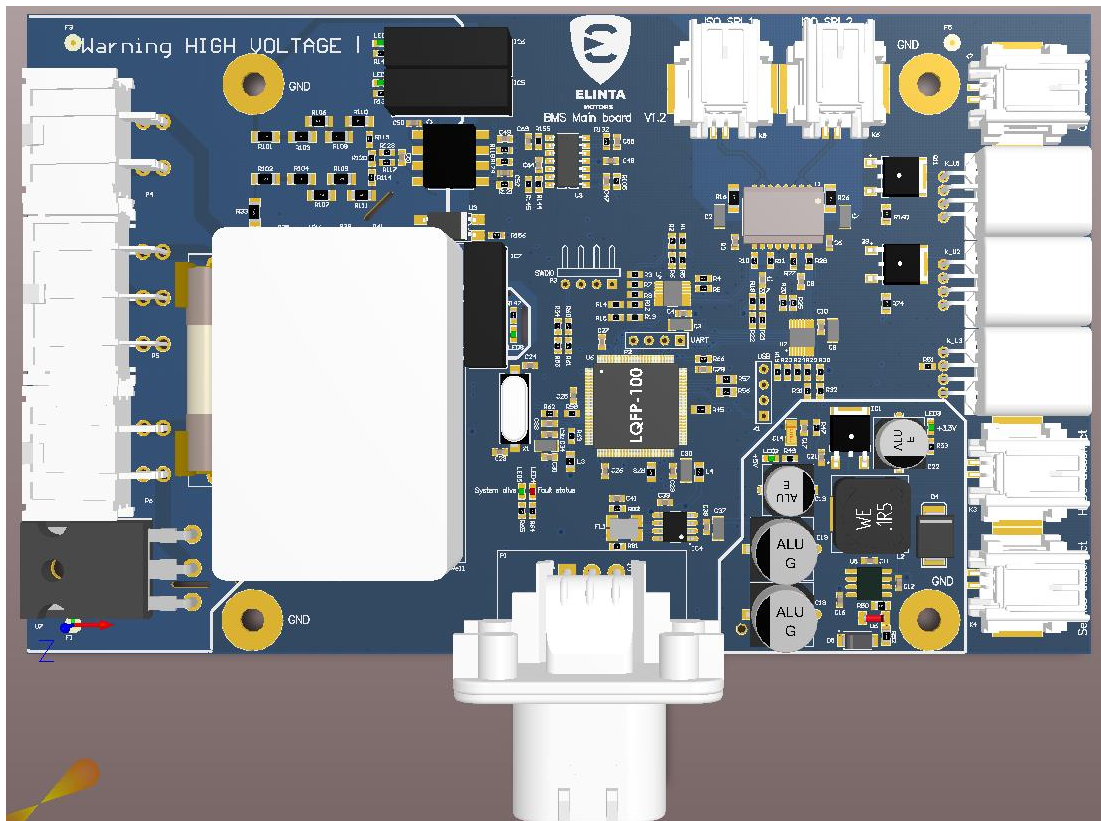
3.2 pav. Centrinės valdymo PCB 1 vidinis sluoksnis.



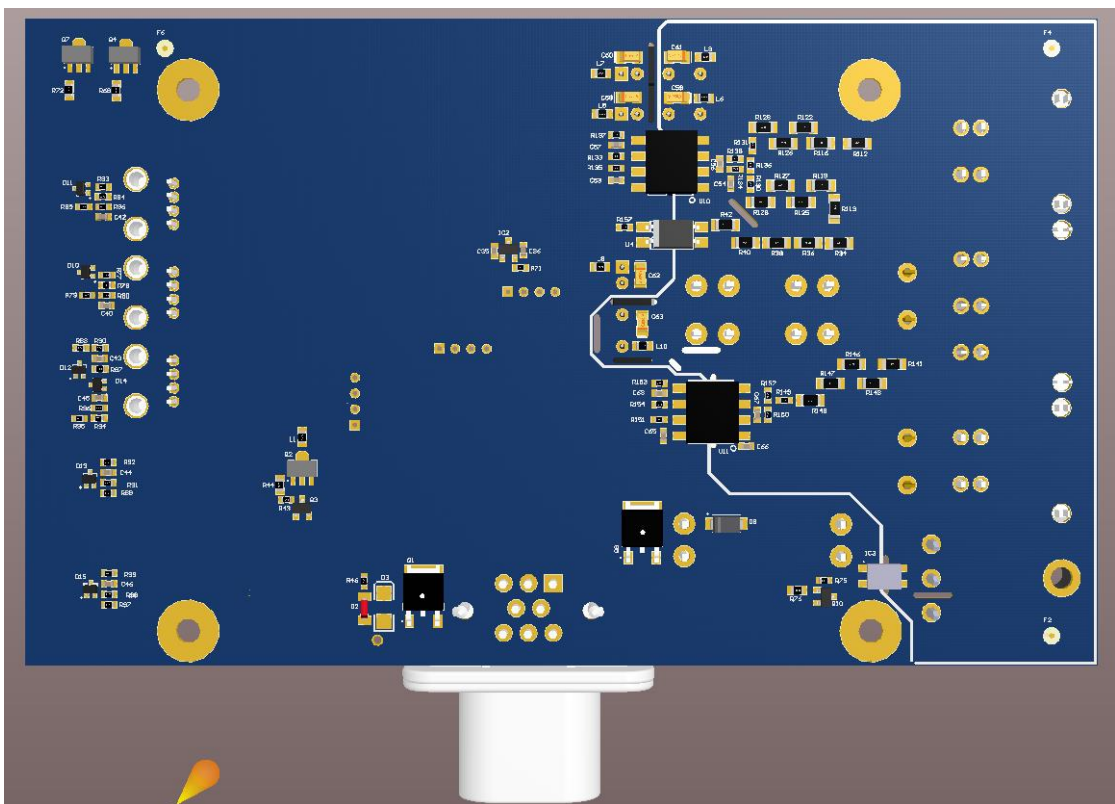
3.3 pav. Centrinės valdymo PCB 2 vidinis sluoksnis.



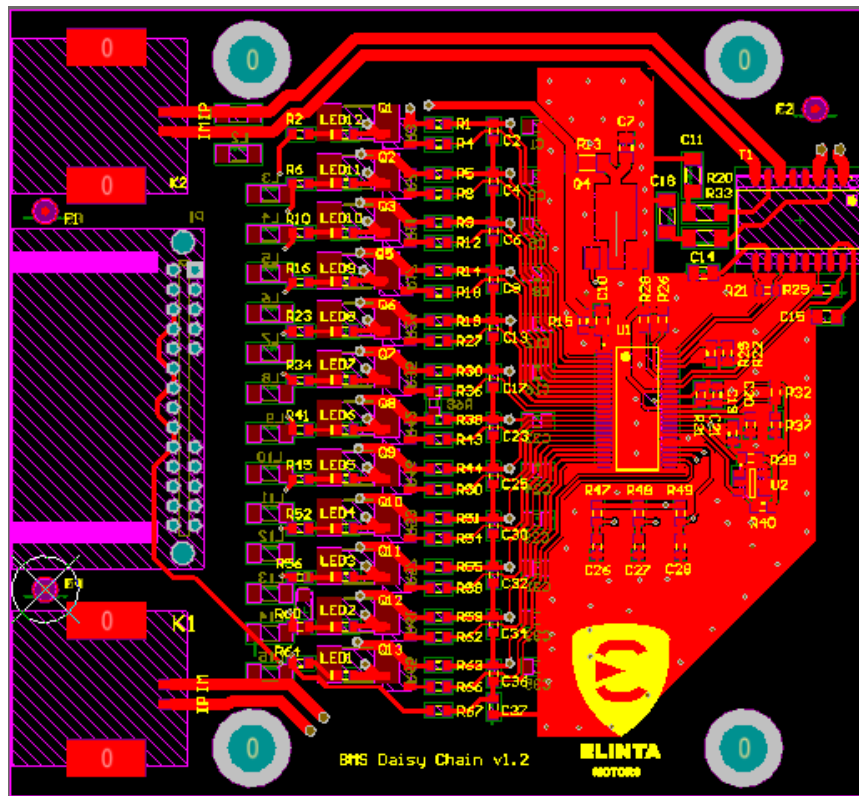
3.4 pav. Centrinės valdymo PCB apatinis sluoksnis.



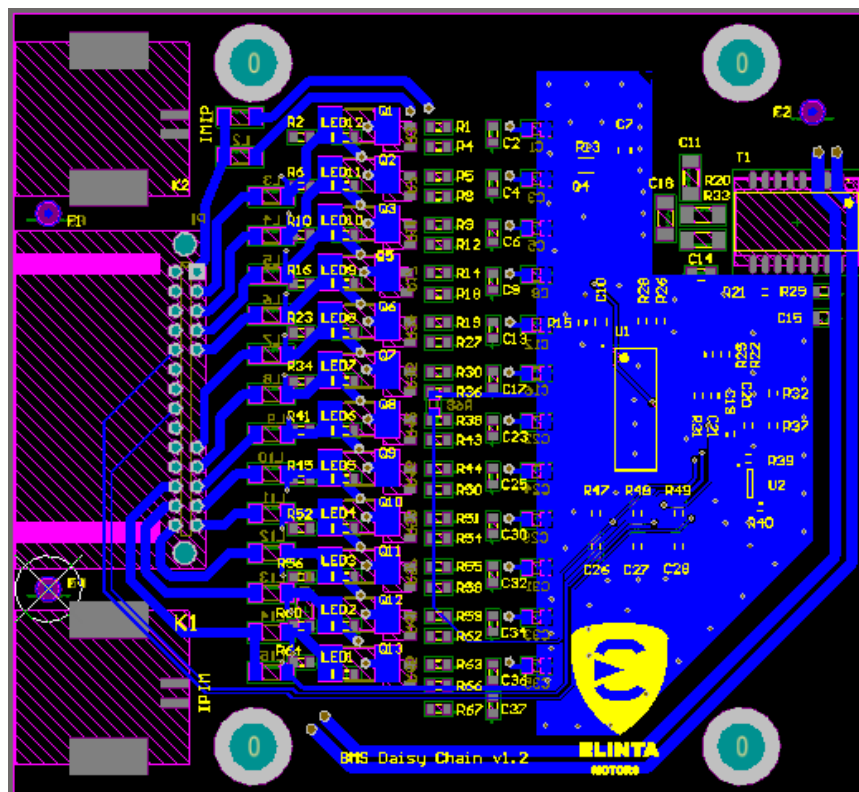
3.5 pav. Centrinės valdymo PCB 3D vaizdas iš viršaus.



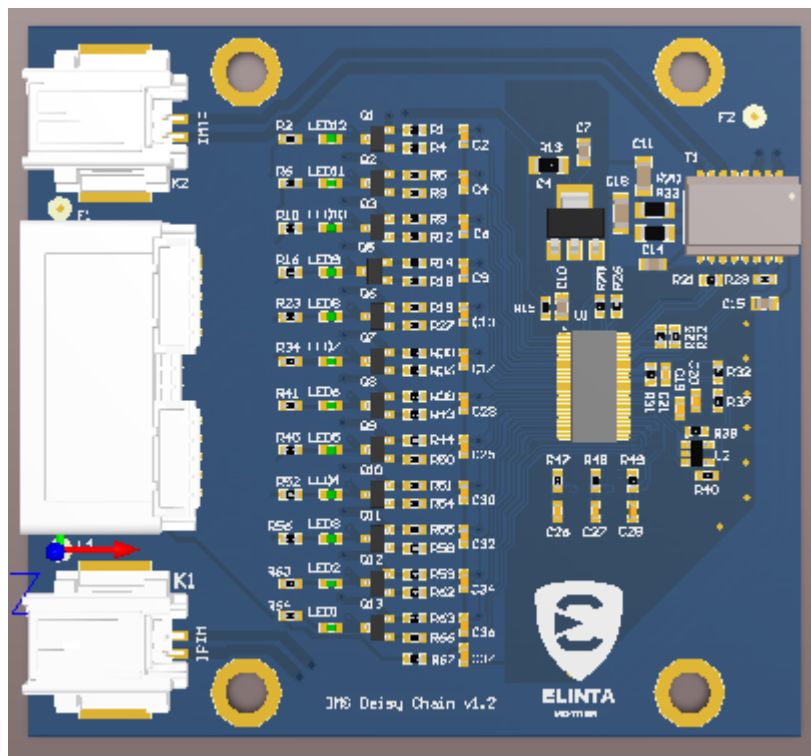
3.6 pav. Centrinės valdymo PCB 3D vaizdas iš apačios.



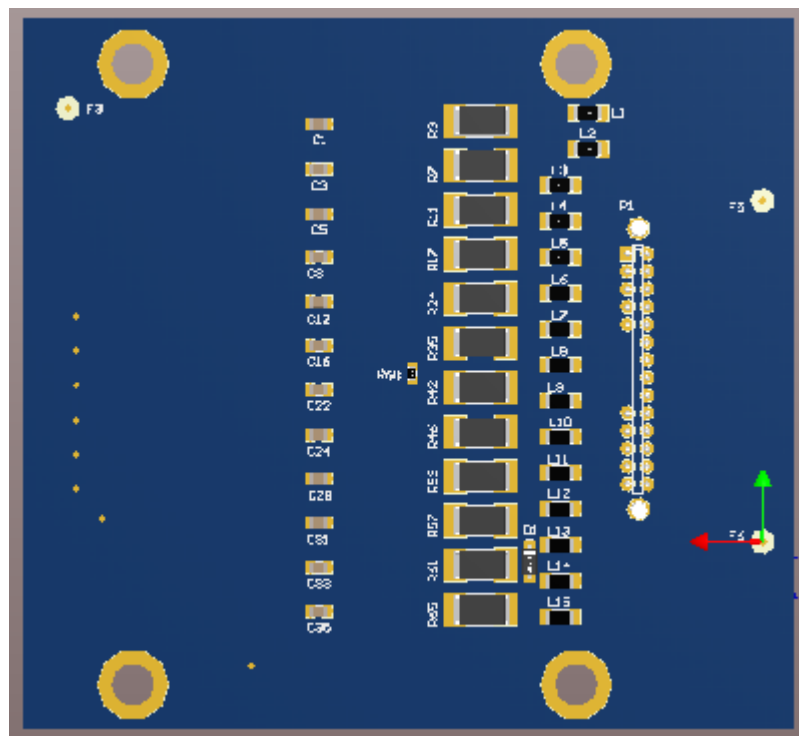
3.7 pav. Balansavimo PCB viršutinis sluoksnis.



3.8 pav. Balansavimo PCB apatinis sluoksnis.



3.9 pav. Balansavimo PCB 3D vaizdas iš viršaus.
3D vaizdas iš apačios.



3.10 pav. Balansavimo PCB 3D vaizdas iš apačios.