

Razvoj visokonapetostnega baterijskega paketa za električni dirkalnik Formule Student

Vid Rajh

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: rajhvid@gmail.com

Povzetek. V članku je predstavljen razvoj baterijskega paketa za električni dirkalnik v okviru tekmovanja Formula Student. Opisani so glavni tehnični izzivi, ki jih postavlja pravilnik, izbira baterijskih celic, konfiguracija paketa, mehanska in električna zaščita ter termalno upravljanje. Poseben poudarek je namenjen lastno razvitemu sistemu za upravljanje baterije (BMS), njegovi arhitekturi, komunikaciji, algoritmih ter testiranju. Članek prikazuje celovit pristop k razvoju varnega, zanesljivega in učinkovitega baterijskega sistema za visokozmogljivo vozilo.

Glavne besede: Formula Student, baterijski paket, litij-polimerne celice, sistem za upravljanje baterije, BMS

Development of high voltage accumulator for Formula Student

This article presents the development of a battery pack for an electric race car designed for the Formula Student competition. It outlines key technical challenges posed by the rules, selection of battery cells, system configuration, mechanical and electrical protection, and thermal management. Special attention is given to a custom-developed Battery Management System (BMS), including its architecture, communication, balancing algorithms, and testing. The article demonstrates a comprehensive approach to designing a safe, reliable, and efficient battery system for a high-performance electric vehicle.

Keywords: Formula Student, battery pack, lithium-polymer cells, battery management system, BMS.

1 UVOD

Formula Student je največje mednarodno inženirsko tekmovanje na svetu [1], namenjeno študentom, ki v interdisciplinarnih ekipah razvijajo, konstruirajo in izdelujejo dirkalnike. Tekmovanje združuje različna področja, vse od tehničnih preizkusov in vožnje do poslovnih in inženirskih predstavitev. V zadnjih letih se vse več ekip osredotoča na električne pogone, saj ti omogočajo večje pospeške, večjo energijsko učinkovitost, boljšo prilagodljivost vozila ter izboljšano vozno dinamiko. Ključni del vsakega električnega dirkalnika je baterijski paket, ki zagotavlja potrebno energijo za pogon ter močno vpliva na zmogljivost in vozne lastnosti vozila. Njegovo delovanje je odvisno od ustreznega nadzora in zaščite, za kar skrbi sistem za upravljanje baterije (BMS).

V tem članku bomo podrobno predstavili razvoj baterijskega paketa za naš električni dirkalnik. V

poglavju 2 bomo povzeli glavne zahteve in izzive, s katerimi smo se soočili pri njegovem razvoju, vključno s tehničnimi omejitvami in pravili tekmovanja Formula Student. Poglavje 3 bo namenjeno zasnovi baterijskega paketa, kjer bomo opisali izbiro baterijskih celic, njihovo serijsko-paralelno povezavo, mehansko zasnovu ter zaščitne mehanizme.

Ker je varno in učinkovito delovanje baterije ključnega pomena, bomo v poglavju 4 obravnavali lastno razviti sistem za upravljanje baterije (BMS). Tam bomo opisali njegovo arhitekturo, funkcionalnosti, algoritme za balansiranje celic in razvoj tiskanih vezij.

Nadalje bomo v poglavju 5 predstavili proces testiranja in validacije, ki vključuje laboratorijske in realne teste, simulacije ter analizo delovanja baterijskega sistema med vožnjo.

2 PRAVILNIK IN ZAHTEVE

Kot vsako tekmovanje ima tudi Formula Student jasno določena pravila, ki jih morajo ekipe strogo upoštevati pri načrtovanju, izdelavi in delovanju dirkalnika. Pravilnik obsega več kot 130 strani in vključuje podrobne smernice s področja strojništva, elektrotehnike in splošnih varnostnih zahtev. Njegov glavni namen ni le določanje tekmovalnih omejitev, temveč zagotavljanje skladnosti z dobro inženirsko prakso ter industrijskimi standardi.

Ker gre za prototipna vozila, ki delujejo pri visokih napetostih in močeh ter dosegajo visoke hitrosti, je skladnost s pravilnikom ključna za zagotavljanje varnosti tako tekmovalcev kot vseh drugih.

Pri načrtovanju baterijskega paketa je spoštovanje pravil še zlasti pomembno, saj pravilnik določa tehnične zahteve, ki zagotavljajo varno in zanesljivo delovanje

Prejet: 2. junij, 2025

Odobren: 5. september, 2025



Avtorske pravice: © 2025
Creative Commons Attribution 4.0
International License

baterije in celotnega pogonskega sistema. Med ključnimi zahtevami so omejitve zmogljivosti in konfiguracije baterije, dovoljeni materiali, mehanska trdnost ter obvezni varnostni mehanizmi. Med njimi sta najpomembnejša sistem za upravljanje baterije (BMS), ki nadzoruje in optimizira delovanje celic, ter sistem za merjenje izolacijske upornosti, ki zazna morebitne okvare med visokonapetostnim (HV) in nizkonapetostnim (LV) sistemom in prepreči nevarne posledice.

V nadaljevanju so povzeta ključna pravila in omejitve, ki jih je treba upoštevati pri razvoju baterijskega paketa.

2.1 Splošne elektrotehnične zahteve

- 1) Maksimalna dovoljena napetost v dirkalniku je omejena na 600 V DC.
- 2) Maksimalna dovoljena izhodna moč iz baterije je 80 kW.
- 3) Baterijski paket mora biti razdeljen na več segmentov.
- 4) Posamezni segment ne sme preseči 120 V DC in mora ostati pod 6 MJ energije.

2.2 Splošne mehanske zahteve

- 1) Celotni baterijski paket mora biti znotraj šasije.
- 2) Vsi materiali, uporabljeni v baterijskem paketu, morajo biti ognjevarni in ustrezati standardu UL94-V0.
- 3) Posamezni segment baterijskega paketa ne sme tehtati več kot 12 kg.
- 4) Baterijske celice morajo biti v segmentih pritrjene po vsaj 80 % površine večje ploskve.

2.3 Varnostne zahteve

- 1) Ohišje baterijskega paketa mora prenesti mehanske udarce, vibracije in morebitne zunanje poškodbe, ne da bi se pri tem poškodovale baterijske celice.
- 2) Sistem za upravljanje baterije (BMS) je obvezen za nadzor ustreznega delovanja baterijskih celic.
- 3) Obvezen je sistem za merjenje izolacijske upornosti, ki omogoča hitro zaznavanje napak in preprečuje nevarne posledice ob morebitni okvari HV-sistema. [2]

Zahteve pravilnika niso namenjene le zagotavljanju enakih pogojev za vse ekipe, temveč tudi spodbujajo tehnično dovršenost in odgovorno načrtovanje. Ekipe morajo pri razvoju ne le izpolnjevati minimalne standarde, temveč tudi uvajati inovacije, ki izboljšujejo varnost in zmogljivost vozila.

3 ZASNOVA BATRIJSKEGA PAKETA

Baterijski paket je eden najpomembnejših sklopov električnega dirkalnika, saj neposredno vpliva na zmogljivost, težo, varnost in zanesljivost vozila. Poleg tega je tudi ena najtežjih komponent vozila, zato je pri

njegovi zasnovi ključnega pomena optimizacija teže, ki vpliva na celotno vozno dinamiko. Pri njegovem razvoju je bilo treba upoštevati številne dejavnike, kot so energijska gostota, maksimalna moč, hlajenje, mehanska trdnost in skladnost s pravilnikom Formula Student. Glavni cilji pri zasnovi so bili zagotoviti čim večjo kapaciteto in moč pri minimalni teži, optimizirati hlajenje ter vključiti robustne varnostne mehanizme.



Slika 1: Baterijski paket sezone 2024/25.

Ena izmed prvih in najpomembnejših odločitev v tem procesu je bila izbira ustreznih baterijskih celic, ki določajo končne karakteristike sistema. V nadaljevanju bomo opisali, katere celice smo izbrali, kako smo jih povezali v konfiguracijo ter kakšne mehanske in električne zaščitne mehanizme smo uporabili pri izdelavi paketa.

3.1 Izbira baterijskih celic

Na trgu je na voljo veliko različnih vrst baterijskih celic, ki se med seboj razlikujejo po obliki, kemiji, zmogljivosti in aplikaciji. Najpogostejše se v visokozmogljivih električnih vozilih uporabljajo cilindrične (18650, 21700), prizmatične in mehke (LiPo pouch) celice, pri čemer ima vsaka vrsta svoje prednosti in slabosti. [3] Pri izbiri celic za naš baterijski paket smo morali upoštevati več ključnih faktorjev, kot so energijska gostota, maksimalna praznilna moč, toplotno upravljanje in mehanska integracija.

Po analizi različnih možnosti smo se odločili za litij-polimerne (LiPo) celice v obliki *pouch*. Te zagotavljajo veliko energijsko gostoto, kar pomeni, da lahko shranijo več energije na enoto mase kot druge vrste. Ena izmed njihovih prednosti je tudi izredno učinkovita izraba prostora, saj jih je mogoče tesno pakirati, kar optimizira prostorsko razporeditev v baterijskem paketu.

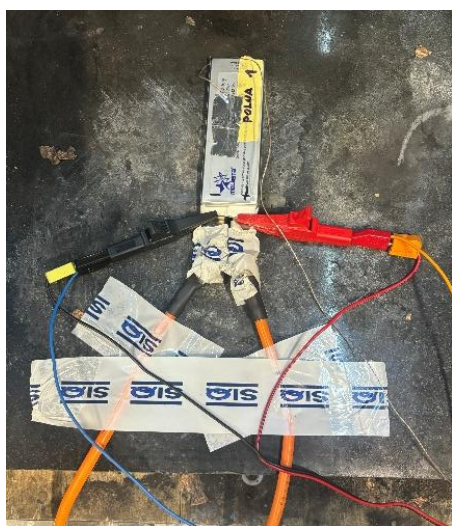
Poleg tega so celice LiPo pouch znane kot *high drain* celice, kar pomeni, da lahko zagotavljajo visoke praznilne tokove brez večjih padcev napetosti. To je še zlasti pomembno pri Formula Student dirkalniku, kjer se od baterije zahteva, da lahko v kratkem času odda veliko moč – sploh med pospeševanjem in vožnjo skozi ovinke.

Seveda imajo celice LiPo tudi nekatere slabosti, kot so večja občutljivost za mehanske poškodbe, možnost napihovanja pri prekomernem polnjenju ali praznjenju ter večja zahtevnost pri upravljanju toplote. [4] Kljub temu smo s skrbno zasnovo mehanske zaščite, električne varnosti in učinkovitega hlajenja zagotovili, da so te celice varna in optimalna izbira za naš dirkalnik.

Ko smo se odločili za tip celice (LiPo pouch), smo od izbranega proizvajalca prejeli seznam razpoložljivih modelov celic. Te so se razlikovale po nazivni napetosti, kapaciteti, dimenzijah in teži, zato je bilo treba izbrati takšno, ki najbolj ustreza našim zahtevam.

Ker pravilnik Formula Student omejuje največjo napetost baterijskega paketa na 600 V in izhodno moč na 80 kW, smo morali pri izbiri celice upoštevati optimalno konfiguracijo baterijskega sklopa, ki zagotavlja dovolj energije za celotno tekmovanje. S preteklih tekmovanj smo vedeli, da najdaljša disciplina Endurance zahteva vožnjo 22 km, kar nam je služilo kot osnovni kriterij pri izračunu potrebne kapacitete baterijskega paketa.

Na koncu smo izbor zožili na dve celici, ki sta imeli kapaciteto 6.800 mAh in 7.000 mAh. Da bi zagotovili, da ustrezata našim zahtevam glede maksimalnih praznilnih tokov in termičnega obnašanja, smo jih testirali na Slovenskem inštitutu za kakovost in meroslovje (SIQ). Tam smo opravili meritve izhodnih tokov, termične analize ter preverjanje skladnosti z našimi varnostnimi zahtevami.



Slika 2: Testiranje celic na SIQ.

Na podlagi teh rezultatov smo se odločili za celico s kapaciteto 7.000 mAh in maksimalno napetostjo 4,2 V, saj je zagotavljala optimalno razmerje med kapaciteto, težo in zmogljivostjo pri visokih tokovih.



Slika 3: Baterijska celica.¹

¹ Vir: <http://www.globalsources.com>

3.2 Konfiguracija baterijskega paketa

Pri določitvi konfiguracije baterijskega paketa smo morali upoštevati več ključnih dejavnikov, ki vplivajo na zmogljivost, varnost in modularnost sistema. Pravilnik Formula Student omejuje največjo dovoljeno napetost na 600 V, hkrati pa določa, da napetost posameznega segmenta ne sme presegati 120 V. Poleg teh omejitev smo morali paziti tudi na težo posameznega segmenta ter skupno energijsko kapaciteto segmenta.

Po izvedbi izračunov glede potrebne energije smo ugotovili, da za doseganje zadostne zmogljivosti potrebujemo vsaj dve celici v paralelni vezavi (2P). To pomeni, da vsaka celica prispeva k skupni kapaciteti in zmanjšuje obremenitev posamezne celice pri praznjenju.

3.2.1 Zaporedna vezava – čim bližje 600 V

Pri zaporedni vezavi smo želeli maksimalno izkoristiti dovoljeno napetost, saj višja napetost pri enaki izhodni moči pomeni nižji tok, kar zmanjšuje izgube zaradi upornosti kablov in povezav. Idealno bi bilo doseči 600 V, zato smo izračunali potrebno število celic:

$$\frac{600 \text{ V}}{4.2 \text{ V}} = 142.8 \quad (1)$$

Ker mora biti število celic v seriji celo število, sta se ponujali dve možnosti:

- 143S (143 zaporedno vezanih celic) → 600,6 V pri polni napolnjenosti (presega mejo pravilnika)
- 140S (140 zaporedno vezanih celic) → 588 V pri polni napolnjenosti

Da bi zagotovili skladnost s pravili in ohranili vse segmente enake, smo se odločili za konfiguracijo 140S, pri kateri maksimalna napetost nikoli ne preseže 600 V. Če bi izbrali 143 celic v seriji, bi morali natančno nadzirati polnjenje, da ne bi presegli 600 V, kar bi dodalo nove kompleksnosti pri upravljanju baterije.

3.2.2 Segmentacija baterijskega paketa

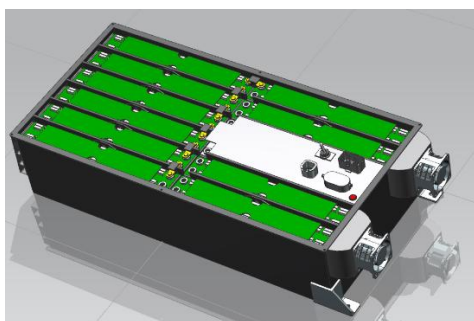
Za lažje vzdrževanje in povečanje zanesljivosti smo se odločili, da baterijski paket razdelimo na 10 enakih segmentov. Vsak segment ima konfiguracijo 14S2P, kar pomeni, da je napetost vsakega segmenta pri polni napolnjenosti $14 \times 4,2 \text{ V} = 58,8 \text{ V}$.

Ta zasnova ima več prednosti:

- Modularnost – če pride do napake v enem segmentu, lahko zamenjamo samo ta segment namesto celotnega baterijskega paketa.
- Boljša diagnostika in servisiranje – lažje odkrivanje napak in vzdrževanje sistema.

- Prilagodljivost pri testiranju in razvoju – omogoča postopno testiranje posameznih segmentov pred sestavo celotnega paketa.
- Po pravilniku Formula Student segment, katerega napetost ne presega 60 V, spada pod nizkonapetostni (LV) sistem, kar pomeni, da je rokovanje z njim varnejše in manj zahtevno glede zaščitnih ukrepov. To olajša uporabo, vzdrževanje in diagnostiko posameznih segmentov baterijskega paketa.

Končna konfiguracija baterijskega paketa je torej 140S 2P, kar pomeni 140 celic v seriji in 2 v paraleli s skupno napetostjo 588 V pri polni napolnjenosti.



Slika 4: Baterijski paket z desetimi segmenti.

3.3 Mehanska zasnova in zaščita

Mehanska zasnova baterijskega paketa je ključnega pomena za zagotavljanje varnosti, zanesljivosti in optimalnega delovanja v dirkalniku. Baterija mora biti dovolj trdna, da prenese vibracije, udarce in druge obremenitve, hkrati pa mora biti čim lažja in kompaktna, saj njena teža neposredno vpliva na vozne lastnosti dirkalnika. Pri načrtovanju smo morali upoštevati mehansko togost, zaščito pred poškodbami, toplotno upravljanje ter skladnost s pravili Formula Student.

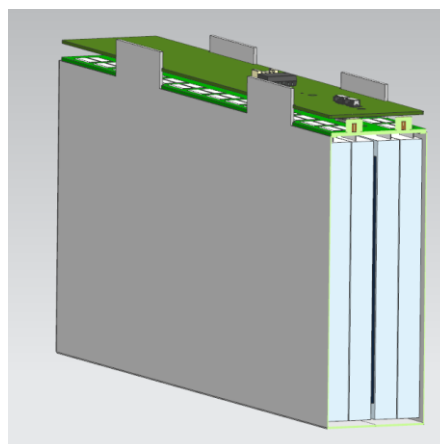
3.3.1 Izbira materiala in konstrukcija ohišja

Zaradi želje po čim manjši teži in čim bolj kompaktni izvedbi smo se odločili, da bomo ohišje in segmente baterijskega paketa izdelali iz steklenih vlaken. Ta material ima več prednosti:

- Zagotavlja zadostno mehansko trdnost, potrebno za zaščito celic.
- Je lahek, kar zmanjšuje skupno maso baterijskega paketa in s tem izboljšuje vozno dinamiko vozila.
- Ni električno prevoden, kar je velika prednost v primerjavi z ogljikovimi vlakni (karbonom), ki so prevodna in bi lahko pomenila varnostno tveganje v primeru poškodbe izolacije. Neprevodnost ohišja pa je pogojena tudi s pravilnikom Formule Student.

3.3.2 Pritrditev celic in zaščita pred vibracijami

Za pritrditev baterijskih celic smo uporabili dvostranski lepilni trak, ki ustreza standardu negorljivosti UL94-V0. Ta trak zagotavlja dovolj močno pritrditev, hkrati pa absorbira vibracije in preprečuje premikanje celic med vožnjo. Ker se baterijski paket med obratovanjem sooča z različnimi mehanskimi obremenitvami, smo zasnovali pritrditev, ki zagotavlja, da celice ostanejo stabilne v vseh pogojih.



Slika 5: Prerez baterijskega segmenta.

Poleg tega smo pri načrtovanju upoštevali naravno otekanje celic med polnjenjem in praznjenjem. Litij-polimerne (LiPo) celice se med delovanjem rahlo napihnejo in skrčijo, kar lahko povzroči mehanske napetosti v paketu in potencialno poškodbe celic [5]. Da bi to preprečili, smo med celice dodali peno, ki kompenzira ta raztezni učinek. Tako smo zagotovili, da je pritisk na celice vedno enakomeren, kar zmanjšuje mehanske obremenitve in podaljšuje življenjsko dobo baterij.

3.4 Električna zaščita

Ker baterijski paket deluje pri visokih napetostih in tokovih, je ustrezna električna zaščita ključnega pomena za varno delovanje vozila. Mogoče napake v sistemu lahko vodijo do kritičnih okvar, kot so prenapetost, prekomerni tokovi, kratki stiki, izolacijske napake in odpoved posameznih komponent, zato je sistem zasnovan tako, da omogoča nenehno spremljanje ključnih parametrov in hitro odzivanje v primeru nepravilnosti.

Za varno delovanje moramo zagotoviti, da napetost vsake celice ostaja v dovoljenih mejah, saj lahko prenapetost in prekomerno praznjenje povzroči trajne poškodbe. Prav tako moramo spremljati celotno napetost baterijskega paketa in tokovno obremenitev, da preprečimo pregrevanje ter mehanske in električne okvare. Posebno pozornost namenjamo izolaciji visokonapetostnega sistema, saj lahko preboj izolacije vodi do nevarnih situacij. Poleg tega mora sistem pravilno upravljati kontaktorje, ki ščitijo baterijo in

preostale komponente vozila. Ključnega pomena je tudi nadzor nad zagonskimi tokovi, kajti nenadni sunki električne energije lahko poškodujejo občutljive elemente pogonskega sistema.

Za preprečevanje teh nevarnosti smo v baterijski paket vgradili več zaščitnih elementov, ki omogočajo natančen nadzor in varno izklapljanje sistema v primeru nepravilnosti.

3.4.1 Ključne komponente električne zaščite v bateriji

Baterijski paket vsebuje več varnostnih komponent, ki zagotavljajo njegovo zanesljivo delovanje:

1. **BMS (battery management system)** skrbi za nadzor napetosti, toka in temperature posameznih celic, izvaja balansiranje in komunicira z VCU vozila.
2. **Glavna varovalka** ščiti baterijski sistem pred kratkimi stiki in prevelikimi tokovi.
3. **Visokonapetostni kontaktorji** omogočajo nadzorovano vklopjanje in izklapljanje baterijskega sistema ter varno izolacijo baterije od celotnega vozila v primeru napake.
4. **Precharge upor** preprečuje tokovne sunke pri vklopu sistema, ki bi lahko poškodovali inverterje in druge električne komponente.
5. **Merilnik izolacijske upornosti (IMD Isolation Monitoring Device)** preverja izolacijo med visokonapetostnim (HV) in nizkonapetostnim (LV) sistemom ter sproži varnostni izklop ob morebitni napaki.
6. **High voltage indicator (HVI)** je indikator, ki se prižge, če je na visokonapetostnem priključku baterije prisotnih več kot 60 V, kar služi kot vizualni opozorilni signal, da je sistem pod napetostjo.

Električna zaščita je nujna za varno in zanesljivo delovanje baterijskega paketa. S pomočjo naprednih zaščitnih mehanizmov in sistemov za nadzor zagotavljamo, da baterijski paket deluje varno in učinkovito tudi v najbolj zahtevnih pogojih.

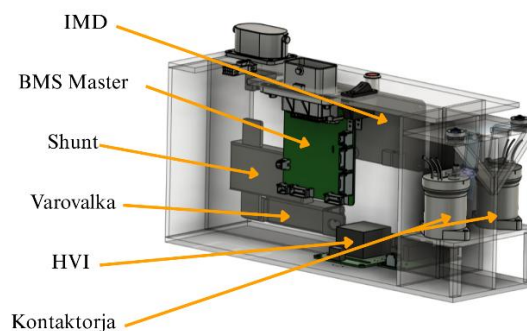
3.5 Nizkonapetostni prostor (low voltage compartment)

Vse zgoraj naštetе varnostne komponente smo v naši bateriji združili v t. i. nizkonapetostni prostor (angl. low voltage compartment). Gre za namensko zasnovan predel baterije, ki je enostavno snemljiv in popolnoma odstranljiv iz preostale baterijske enote. V njem so vsa nizkonapetostna vezja, varovalke, kontaktorji, merilne enote ter tako rekoč vse preostale komponente, ki niso neposredno del baterijskih segmentov.

Takšna modularna zasnova je redkost v svetu Formule Student, na kar smo posebno ponosni. Omogoča nam enostaven dostop do ključnih komponent, to pa bistveno olajša servisiranje, odpravljanje napak ter testiranje. Poleg tega so vse občutljive nizkonapetostne

komponente dodatno zaščitene, saj so mehansko ločene od preostalih delov baterije z ojačanimi predeli iz steklenih vlaken, ki zagotavljajo tako mehansko kot električno izolacijo.

Ta pristop ne izboljšuje le vzdržljivosti in varnosti baterije, temveč prispeva tudi k večji preglednosti, enostavnosti montaže ter učinkovitejšemu razvoju med tekmovalno sezono.



Slika 6: Nizkonapetostni prostor.

4 RAZVOJ LASTNEGA BMS

Sistem za upravljanje baterije (BMS – battery management system) je ključna komponenta vsakega visokonapetostnega baterijskega paketa, saj skrbi za varno in optimalno delovanje celic. Njegova glavna naloga je spremljanje napetosti in temperature celic, upravljanje balansiranja, zaznavanje napak ter komunikacija z drugimi sistemi vozila, kot je VCU (vehicle control unit).

Na trgu obstajajo številne komercialne rešitve BMS, ki so namenjene splošni uporabi; vendar smo se odločili, da razvijemo lastni BMS, saj smo želeli sistem, ki je prilagojen specifičnim zahtevam našega baterijskega paketa in dirkalnika.

4.1 Razlogi za razvoj lastnega BMS

Razvoj lastnega BMS smo izbrali iz več razlogov:

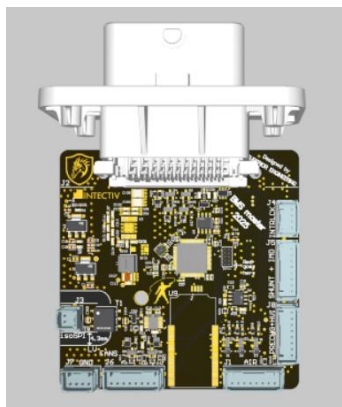
Finančna optimizacija – Komercialni BMS sistemi so pogosto zelo dragi, zlasti tisti, ki izpolnjujejo vse zahteve za visokonapetostne aplikacije. Z lastnim razvojem smo stroške zmanjšali.

Prilagoditev specifičnemu sistemu – Večina obstoječih sistemov BMS je zasnovanih za splošne aplikacije, zato vključujejo številne funkcionalnosti, ki jih ne potrebujemo. Z lastnim sistemom smo izključili nepotrebne funkcije in optimizirali delovanje za naš dirkalnik.

Integracija s celotnim vozilom – Želeli smo BMS, ki se popolnoma ujema s sistemom našega dirkalnika, predvsem z VCU (vehicle control unit) ter omogoča hitro in zanesljivo komunikacijo.

Popoln nadzor nad funkcionalnostmi – Ker smo BMS razvili sami, imamo popoln nadzor nad njegovim

hardverom in softverom, kar nam omogoča enostavne nadgradnje in prilagoditve v prihodnosti.



Slika 7: BMS Master

4.2 Ključne zahteve BMS

Pri razvoju našega sistema smo določili glavne funkcionalne zahteve, ki jih mora naš BMS izpolnjevati:

1. Nadzor napetosti posameznih celic – BMS mora spremljati napetost vsake celice, da prepreči predvsem prenapetost ali prekomerno praznjenje.
2. Nadzor temperature – sistem mora preprečiti pregrevanje.
3. Varnostni izklop v primeru napake – BMS mora zaznati morebitne napake in ob kritični situaciji prek kontaktorjev odklopiti baterijski paket.
4. Balansiranje celic – ker imajo celice naravno različne stopnje samopraznjenja, BMS zagotavlja pasivno balansiranje, s čimer ohranja vse celice v optimalnem stanju.
5. Komunikacija z VCU (vehicle control unit) – BMS mora prenašati ključne podatke o bateriji in sprejemati ukaze iz VCU.

4.3 Arhitektura sistema BMS

Sistem za upravljanje baterije (BMS) deluje v centralizirani arhitekturi, kjer BMS Master nadzoruje BMS Slave enote. V naši bateriji imamo eno BMS Master vezje, medtem ko ima vsak segment svoje BMS Slave vezje, kar skupaj pomeni deset BMS Slave enot.

4.3.1 BMS Master

BMS Master je glavna enota sistema, ki izvaja kompleksne nadzorne funkcije in upravlja komunikacijo s preostalimi sistemi vozila. Glavne komponente BMS Master vezja so:

- Mikrokontroler STM32F3 – osrednji procesor, ki izvaja RTOS in nadzoruje vse ključne funkcije BMS.
- Komunikacijski vmesnik za CAN – omogoča prenos podatkov med BMS in VCU.

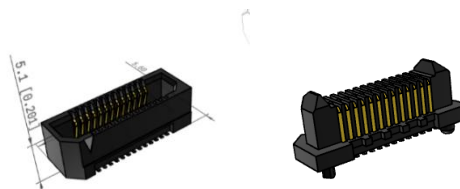
- Komunikacijski vmesnik za izolirano SPI-komunikacijo – uporablja se za povezavo z BMS Slave enotami in zagotavlja galvansko ločitev.
- Nadzor kontaktorjev – BMS preverja stanje kontaktorjev in ob napaki sproži varnostni izklop.
- Upravljanje ventilatorjev – nadzoruje hlajenje baterijskega sistema na podlagi meritev temperature. Ventilatorje upravlja s pulzno širinsko modulacijo, hkrati pa dobiva povratno informacijo od ventilatorjev o dejanskih vrtljajih.
- Nadzor IMD (isolation monitoring device) – sproži izklop v primeru, da IMD sporoči napako.

4.3.2 BMS Slave in Busbar

Letošnja sezona prinaša pomembno inovacijo tudi na področju arhitekture nadzora baterijskih celic, saj smo se odločili za prehod na stackup konfiguracijo Busbar + BMS Slave. V sodelovanju z enim izmed slovenskih proizvajalcev tiskanih vezij smo razvili namensko Busbar vezje za našo baterijo.

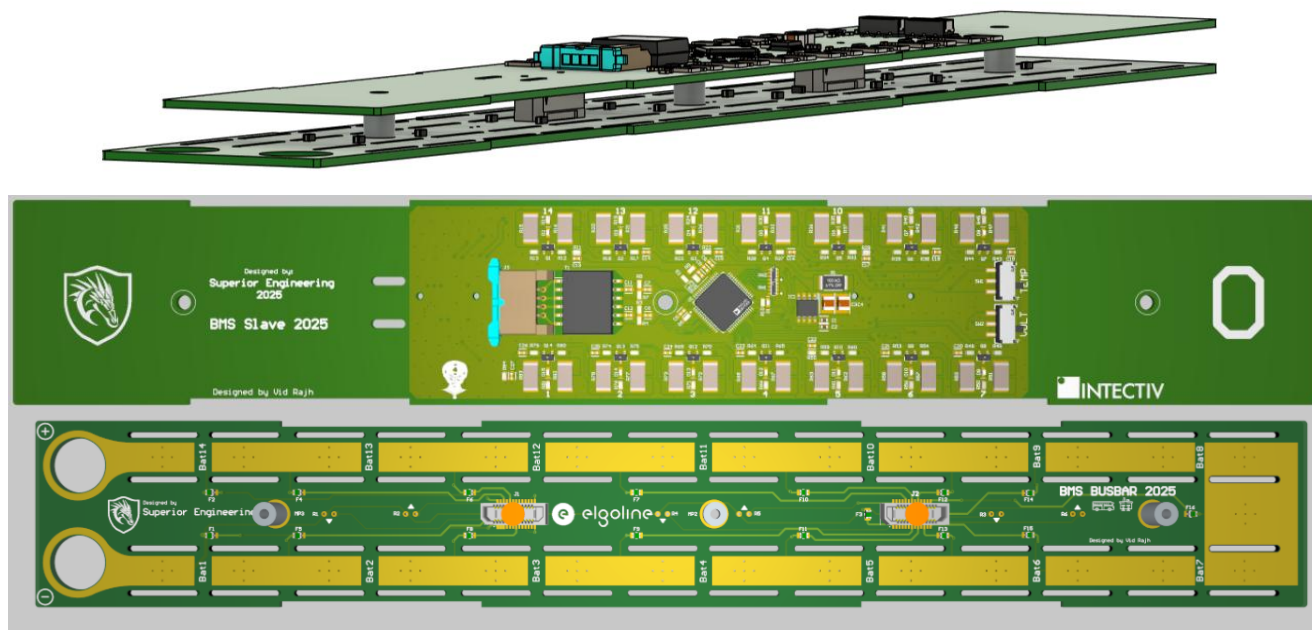
Gre za 2 mm debelo večplastno tiskano vezje, v katero so delno vgrajene bakrene ploščice. Te segajo približno do dveh tretjin debeline vezja, kar omogoča ključno posebnost naše zasnove, saj kontakti niso speljani iz ploščic z dodatnimi žicami, temveč so neposredno povezani s signalnimi plastmi vezja. S tem se električni signali (napetosti posameznih celic in signali temperaturnih senzorjev) neposredno prenesejo na BMS Slave prek konektorjev board-to-board – brez potrebe po ločenem ožičenju.

Ta rešitev je velik korak naprej, kar zadeva zanesljivost, zmanjšanje kompleksnosti in električno čistost sistema. Odpravili smo množico senzornih žic, ki so bile v prejšnjih izvedbah vir mehanskih težav, šuma in zahtevnega sestavljanja. Celoten sistem je zdaj bolj modularen, preglednejši in primeren za hitrejšo servisiranje ter zanesljivejše delovanje na dirkališču.



Slika 8: Konektor board to board.

BMS Slave enote so komponenta našega baterijskega sistema, namenjena merjenju napetosti in temperature posameznih celic ter pasivno balansiranju celic. Vsaka BMS Slave enota je odgovorna za določen sklop celic v baterijskem paketu in periodično pošilja podatke Master enoti, ki nadzoruje celoten BMS-sistem.



Slika 9: Busbar in BMS Slave

V središču vsake enote je namenski čip LTC6813, visokointegrirano vezje, namenjeno natančnemu spremljanju napetosti do 18 celic hkrati. Čip omogoča tudi priklop temperaturnih senzorjev (npr. NTC-termistorjev) ter upravljanje balansirnih elementov. Komunikacija med BMS Slave enotami in Masterjem poteka prek galvansko izolirane SPI-povezave, kar zagotavlja varno in proti motnjam odporno izmenjavo podatkov tudi v zahtevnem visokonapetostnem in okolju.

Enote so povezane v t. i. verižni (daisy chain) konfiguraciji, ki omogoča učinkovito zaporedno komunikacijo brez potrebe po ločenih povezavah z vsako posamezno enoto. Tak pristop omogoča boljšo modularnost, enostavnejšo diagnostiko in manjšo kompleksnost ožičenja.

Poleg merjenja napetosti in temperature imajo BMS Slave enote tudi balansirne upore, ki omogočajo praznjenje posameznih celic. Balansiranje je ključno za zagotavljanje enakomerne napetosti med celicami – še zlasti ob koncu polnjenja. Enakomerno napolnjene celice omogočajo tudi enakomernejše praznjenje, kar vodi do večje izkoriščenosti razpoložljive kapacitete baterije.

V tekmovalnem okolju, kot je Formula Student, kjer šteje vsak delček energije, je to izjemno pomembno za doseganje optimalne zmogljivosti.

4.4 Programska arhitektura BMS

Za zagotavljanje realnočasovnega delovanja in učinkovitega upravljanja več procesov hkrati BMS uporablja FreeRTOS. Sistem temelji na večopravilnem (*multitasking*) delovanju, kjer posamezne naloge delujejo kot ločeni "taski" z različnimi prioritetami.

Glavne funkcionalnosti, ki jih izvaja FreeRTOS:

1. Merjenje napetosti celic – periodično spremljanje vsake posamezne celice.
2. Merjenje temperature – spremljanje stanja baterije za preprečevanje pregrevanja.
3. Balansiranje celic – aktivira balansirne upore pri celicah z višjo napetostjo.
4. Upravljanje ventilatorjev – nadzor hlajenja glede na temperaturne podatke.
5. Nadzor kontaktorjev – zagotavlja, da so kontaktorji pravilno vključeni/izključeni.
6. Merjenje skupne napetosti in toka – spremljanje celotnega energijskega stanja baterije.
7. Komunikacija z VCU prek CAN – pošiljanje ključnih podatkov o bateriji v realnem času.
8. Spremljanje IMD – zaznavanje težav z izolacijo in sprožitev varnostnih ukrepov.

Vsaka od teh funkcij deluje kot posebno opravilo (angl. task) v RTOS, kar pomeni, da lahko sistem hkrati izvaja več procesov, ne da bi se pri tem pojavile zakasnitve ali napake.

5 ANALIZA DELOVANJA

Preden smo baterijski sistem uporabili v vozilu, smo izvedli temeljito tokovno testiranje z aktivnim bremenom, s katerim smo preverili odziv vseh ključnih zaščitnih mehanizmov. Preverjali smo delovanje zaščit pred prenapetostjo, podnapetostjo, previsoko temperaturo celic in komponent ter pravilnost prekinitev ob komunikacijskih napakah ali napakah v sistemu napajanja. Vsi varnostni pogoji so bili uspešno simulirani in pravilno zaznani, s čimer smo potrdili zanesljivost celotnega varnostnega sistema še pred prvo dejansko uporabo v vozilu.

Slika 11: Izpis podatkov iz baterije ob priklopu na računalnik.

Po uspešnih laboratorijskih preizkusih smo sistem predstavili v realne pogoje in ga začeli spremljati med testnimi vožnjami. Sistem BMS se je izkazal kot izredno stabilen in odziven tako v obdobjih nizke obremenitve kot tudi med konicami, ko celoten pogonski sklop črpa maksimalne tokove iz baterijskega paketa. Napetosti celic so bile ves čas natančno nadzorovane, temperaturna slika celotnega sklopa pa je ostajala znotraj varnih meja, kar je ključno za ohranjanje življenjske dobe celic.

Balansiranje celic se je izkazalo za učinkovito – ob koncu polnjenja razlike med napetostmi posameznih celic večinoma ne presegajo 5 mV, kar omogoča, da se vse celice enakomerno napolnijo. To je ključno, saj neenakomerno napolnjene celice povzročajo prezgodnje izklope med praznjenjem, kar pomeni izgubo uporabne energije. Z učinkovitim balansiranjem tako izkoristimo skoraj celotno kapaciteto baterije, kar je v tekmovalnem okolju, kot je Formula Student, izjemno pomembno za doseganje najboljših rezultatov na progi.

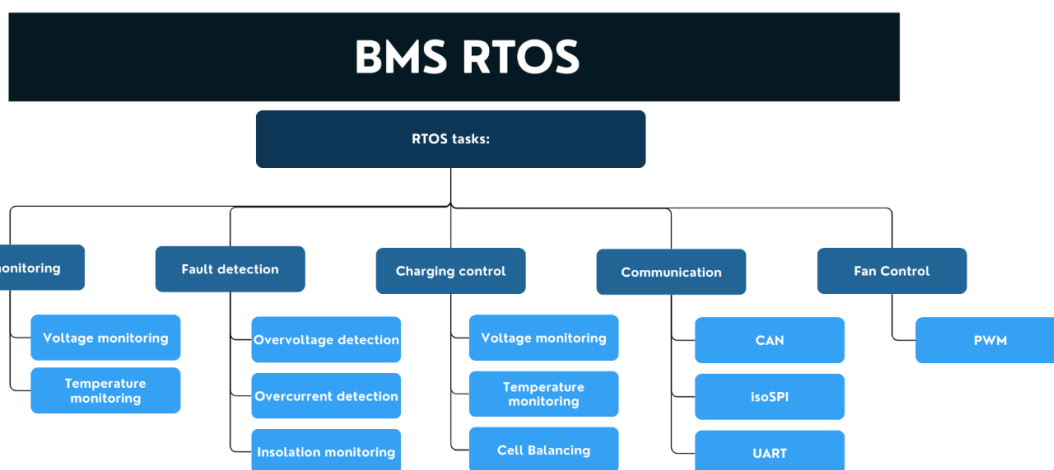
Komunikacija med enotami, izvedena prek galvansko izolirane SPI-povezave v verižni (*daisy chain*) topologiji, se je med testiranjem in vožnjami izkazala za izjemno stabilno. Tudi v pogojih močnih elektromagnetnih motenj, tresljajev in temperaturnih nihanj ni prišlo do izgub podatkov ali napak v komunikaciji. S tem smo potrdili robustnost naše zasnove, ki omogoča nemoteno spremljanje stanja baterije v vseh fazah delovanja.

Poleg tega se je izkazala tudi velika prednost Busbar + BMS Slave stackup dizajna. Mehansko integrirani kontakti, speljani iz bakrenih ploščic neposredno na vezje, so odpravili potrebo po dodatnem ožičenju, kar je bistveno zmanjšalo možnost mehanskih poškodb in zmanjšalo kompleksnost sestavljanja. Vsi spoji so se izkazali za stabilne in zanesljive, kar olajša tudi servisiranje in zamenjavo posameznih komponent, če bi bilo to potrebno.

Celoten sistem je v praksi tako pokazal visoko stopnjo zanesljivosti, natančnosti meritev in odpornosti proti zunanji vplivom, kar nam daje dodatno samozavest pri načrtovanju strategije vožnje in maksimiranju zmogljivosti na dirkališču.

6 ZAKLJUČEK

Zasnova in izdelava baterijskega paketa za naš električni dirkalnik je bila eden od najbolj kompleksnih inženirskih izzivov v sezoni 2024/25. S celovitim pristopom smo uspešno razvili sistem, ki združuje veliko energijsko gostoto, mehansko robustnost, napredno električno zaščito in modulno arhitekturo, prilagojeno zahtevnemu okolju Formule Student.



Slika 10: Programska struktura BMS.

Z odločitvijo za lastno razviti sistem BMS smo pridobili popoln nadzor nad delovanjem baterije, kar nam omogoča hitro odzivanje, zanesljivo komunikacijo z drugimi sistemi vozila ter učinkovito balansiranje celic. Inovacija v obliki stackup arhitekture Busbar + BMS Slave se je v praksi izkazala za izjemno uspešno, saj zmanjšuje mehansko kompleksnost in povečuje zanesljivost.

Testiranja so potrdila stabilnost in natančnost sistema tako v laboratoriju kot v realnih voznih pogojih, kar je ključnega pomena za varno in zmoGLjivo delovanje vozila na dirkališču.

Pogled v prihodnost pa že vključuje nadgradnje algoritmov, izboljšano hlajenje ter širšo integracijo v preostale sisteme vozila. Verjamemo, da smo s tem projektom postavili trdne temelje za še bolj napredne rešitve v naslednjih sezonah in pomemben korak naprej v razvoju električnih dirkalnikov.

Vid Rajh je leta 2025 diplomiral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer trenutno nadaljuje magistrski študij elektronike. V letih od 2022 do 2025 je bil aktiven član univerzitetne ekipe Formula Student – Superior Engineering, kjer je sodeloval pri razvoju električnega dirkalnika, predvsem na področju baterijskih in visokonapetostnih sistemov.

LITERATURA

- [1] F. S. Switzerland, „What is Formula Student?“, [Elektronski]. Dostopno: <https://formulastudent.ch/what-is-fs.php>. [Poskus dostopa 20.1.2025].
- [2] F. S. Germany, „Formula Student Germany“, 2025. [Elektronski]. Dostopno: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2025/rules/FS-Rules_2025_v1.1.pdf. [Poskus dostopa 22.1.2025].
- [3] S. Melançon, „Laserax“, 6.5.2022. [Elektronski]. Dostopno: <https://www.laserax.com/blog/ev-battery-cell-types>. [Poskus dostopa 1.2.2025].
- [4] J. Shepard, „Battery power tips“, 30.6.2021. [Elektronski]. Dostopno: <https://www.batterypowertips.com/difference-between-lithium-ion-lithium-polymer-batteries-faq/>. [Poskus dostopa 1.2.2025].
- [5] P. Höschele, S. F. Heindl, S. Erker in C. Ellersdorfer, „Influence of reversible swelling and preload force on the failure behavior of a lithium-ion pouch cell tested under realistic boundary conditions“, 7. april 2023. [Elektronski]. Dostopno: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X23006254>. [Poskus dostopa 2. februar 2025].