GBS – GLAGOL BATTERY SYSTEM – MODULARNI BATERIJSKI SISTEMI VISOKIH PERFORMANSI VIŠENAMENSKE ULOGE

GBS – GLAGOL BATTERY SYSTEM – HIGH PERFORMANCE MODULAR MULTIFUNCTION BATTERY SYSTEM

Nenad ĐALOVIĆ[1], Nemanja NEŠKOVIĆ[1], Mihajlo MRVOŠEVIĆ[1], Marta AVRAMOVIĆ[2*],
[1] Tehničko-Inženjerski zavod Glagol D.O.O
[2] Alfa Elektrik D.O.O

Uprkos činjenici da ne predstavlja rešenje koje je najpodobnije sa stanovišta ekologije, litijum-jon nedvosmisleno predstavlja jedan od najefikasnijih načina za skladištenje električne energije. Kako bi se iz ove thenologije izvukao maksimum, potrebno je obezbediti visoku snagu pražnjenja, kapacitet, a sa druge strane opet osigurati što duži životni vek i bezbednu eksploataciju inače reaktivnih ćelija. Aplikacije kao što su akumulatori za električna vozila zahtevaju i kompaktnost kako se ne bi narušila ergonomija vozila. Kooperacija Tehničko-Inženjerskog Zavoda Glagol (u daljem tekstu „TIZ Glagol“) i "Alfa Elektrika" je razvila različita rešenja baterijskih sistema koji ispunjavaju sve ove kriterijume. Baterije imaju mogućnost pasivnog ili aktivnog tečnog hlađenja, zavisno od tražene snage eksploatacije. Kako bi sistem ostao bezbedan, sistem za nazdor baterije (BMS - Battery Management System) razvijen od strane kooperantskih firmi u toku celog životnog veka vrši dijagnostiku i preventivno reagovanje u slučaju kvara. Kao i ostali proizvodi Glagola, BMS šalje podatke na Cloud i obaveštava korisnika o stanju sistema. Integrisani su i drugi komunikacioni protokoli koji omogućavaju umreženost baterije i potrošača (invertor motora kod automobila, UPS kontrola kod sistema neprekidnog napajanja, itd.). Baterija ima modularan koncept i omogućava laku nadogradnju radi promene naponskog nivoa, kapaciteta ili snage pražnjenja.

Ključne reči: *Sistemi za upravljanje baterijama; baterije; distribuirani izvori; elektromobilnost*

Despite the fact that lithium-ion may not be the best solution from the eco-friendly standpoint, it is indubitably one of the most efficient ways to store electric energy. For maximum performance, it is necessary to ensure high discharge power, capacity, and on the other hand to ensure the longest possible lifespan and safe operation of otherwise reactive cells. Applications such as batteries for electric vehicles also require compactness so as not to impair the ergonomics of the vehicle. The cooperation between Tehničko-Inženjerski Zavod Glagol (further: „TIZ Glagol“) and "Alfa Elektrik" has developed various solutions for battery systems that meet all these criteria. The batteries have the possibility of passive or active liquid cooling, depending on the required operating power. To keep the system safe, the Battery Management System (BMS) developed by the cooperating companies throughout its lifetime performs diagnostics and preventive response in case of failure. Like other "TIZ Glagol" products, BMS sends data to the Cloud and notifies the user of the system status. Other communication protocols are also integrated, enabling battery and consumer communication (motor inverter for cars, UPS control for uninterruptible power supply systems, etc.). The battery has a modular concept and allows easy upgrades to change the voltage level, capacity or discharge power.

Key words: *Battery management system; battery; distributed generation; e-mobility*

1 Uvod

Električne baterije se danas koriste kao čest izvor napajanja za uređaje u domaćinstvu, u mobilnim telefonima, u prenosnim računarima, u industriji, i u poslednjih dvadesetak godina u automobilima. Pod pojmom baterija obično se misli na jedan elektrohemijski spreg što nije u

* Corresponding author's email: martaavramovic015@gmail.com

potpunosti tačno. Naime, jedan elektrohemijski izvor energije pravilno se naziva ćelija, dok je pravilan naziv za skup od dve ili više povezanih ćelija – baterija.

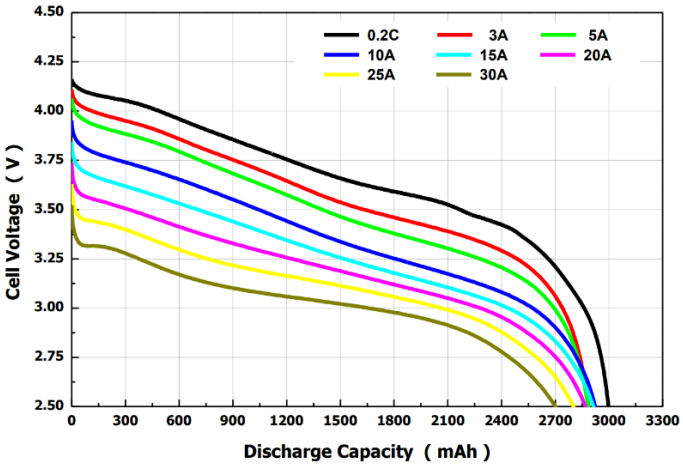
Prvu električnu bateriju dizajnirao je Aleksandar Volta, davne 1800. godine. Od tada, tehnologija izrade baterija je konstatno napredovala, te danas na tržištu postoji nekoliko različitih tipova električnih baterija, poput olovnih, nikl-metal-hidridnih i litijum-jonskih. U električnim vozilima, kao i u sistemima za skladištenje energije, danas se najčešće koriste litijum-jonske baterije.

Sa padom cene ćelija, kao i sa razvojem novih, snažnijih i dugotrajnijih ćelija pospešuje se razvoj elektro mobilnosti i omogućava se pouzdanija proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora.

1.1 Karakteristike Litijum-jonskih baterija

U odnosu na ostale tipove električnih baterija, litijum-jonske baterije imaju veliku gustinu energije, omogućavaju velike struje pražnjenja i imaju slabo izražen efekat samo-pražnjenja. Najveći nedostatak litijum-jonskih baterija predstavlja kratak životni vek. Naime, nakon nekoliko stotina ciklusa „poptuno pražnjenje – potpuno punjenje“ njihov kapacitet se smanjuje na ispod 80 % početnog.

Ponašanje litijum-jonskih baterija tokom pražnjenja najbolje se može videti pomoću krive pražnjenja kao što je prikazano na slici 1. Ove krive prikazuju napon ćelije u odnosu na njen kapacitet pri konstatnoj struji pražnjenja. Prilikom eksploatacije ćelija, potrebno je obezbediti da njihov napon ne padne ispod prekidnog napona[†] i da ćelija ne uđu u poslednji, eskponencijalni deo krive pražnjenja. U tom sektoru, ćelije se više zagrevaju i njihov kapacitet se bespovratno smanjuje.



Slika 1: Primer krive pražnjenja jedne litijum-jonske ćelije

Dozvoljeni radni opseg litijum-jonskih ćelija iznosi -20 – 60 °C, te je od izuzetne važnosti pravilno isprojektovati sistem za hlađenje baterije. Pri eksploataciji, redno povezane ćelije se neravnomerno troše što utiče na rad i dugotrajnost sistema. Iz tog razloga, preporučljivo je makar pri procesu punjenja vršiti balansiranje ćelija kako bi se postiglo ravnomerno punjenje svih ćelija. Balansiranje redno povezanih ćelija se vrši pomoću posebnih balans kola, dok paralelno povezane ćelije se samostalno balansiraju. Za praćenje stanja ćelija tokom eksploatacije, potrebno je koristiti sistem za upravljanje baterijama, takozvani *BMS*.

2 Razvojni put GBS-a

Razvojni put *GBS*-a, kompanije *TIZ Glagol* počinje 2017. godine, kada je otpočelo projektovanje prvog prototipa sistema za upravljanje stanjem baterije. Sledeća iteracija *BMS*-a otklonila je pojedine probleme dok je potpuno funkcionalan *BMS* kreiran u trećoj iteraciji nakon formiranja partnerstva sa firmom *Alfa Elektrik* na polju razvoja softvera. Do danas, ova kolaboracija razvila je nekoliko baterija različitih naponskih nivoa za potrebe električnih vozila. Iskustvo na studijama u projektu

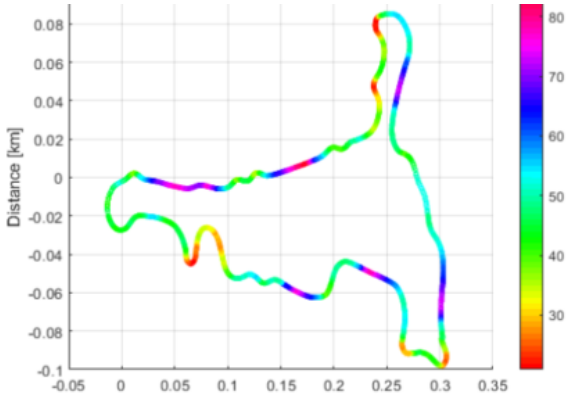
[†] Prekidni napon litijum-jonskih ćelija iznosi 2,5 – 3,2 V, zavisno od modela ćelije.

Formula Student Drumska Strela pomoglo je autorima rada da steknu dragoceno iskustvo u oblasti projektovanja i testiranja električnih baterija.

2.1 Idejni koncept baterije električnog Formula Student vozila

Proces projektovanja baterije za električno vozilo je kompleksan zadatak sa obzirom da baterija predstavlja jedan od najvećih, najtežih i najbitnih delova na vozilu koji drastično utiče na dizajn ostalih delova. Na početku razvoja baterije potrebno je definisati zahteve poput ambijentalne temperature tokom rada, maksimalnih dozvoljenih gabarita, radnog napona invertora i potrošnje elektro motora. Jedan od najbitnijih parametara pri projektovanju predstavlja očekivani profil opterećenja vozila, pomoću kojeg se proračunava neophodan kapacitet i konfiguracija ćelija[‡].

Za potrebe proračuna baterije iskorišćeni su prikupljeni podaci sa studentske formule sa motorom Sa unutrašnjim sagorevanjem („SUS“), prikazani na slici 2, kako bi se na osnovu profila vožnje i pravolinijskog dinamičkog modela vozila izračunao potreban kapacitet. Sa obzirom da je pri izračunavanju korišćen uprošćeni dinamički model vozila, neophodno je dobijene vrednosti uvećati za 20%, kao i uvažiti efikasnost motora i invertora.



Slika 2: Primer jednog kruga trke sa prikazanom brzinom kretanja vozila

Rezultati proračuna prikazani su u tabeli 1.

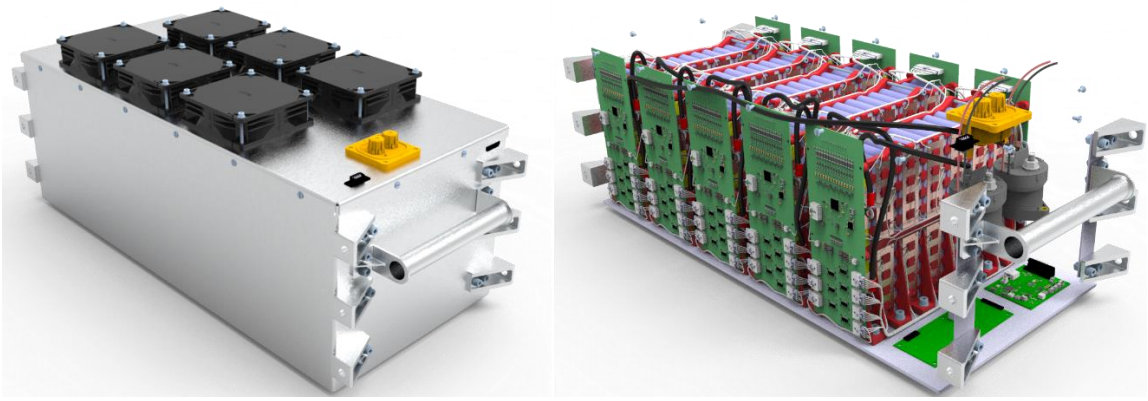
Tabela 1: Proračun utrošene energije tokom trke[§]

Takmičenje	*Italija*	*Češka*
Prosečna brzina [km/h]	44,2	39,8
Prosečna sila otpora usred kotrljanja [N]	35,3	35,4
Prosečna sila otpora vazduha [N]	117,8	121
Prosečna inercijalna sila otpora [N[	472,4	692,8
Utrošena energija [kWh]	3,98	4,1

Izabrane su litijum-jonske ćelije *Sony VTC6* koje su tada imale najbolji odnos između gabarita, maksimalne struje pražnjenja i kapaciteta. Uzimajući u obzir proračunati kapacitet, potrošnju motora i radni napon invertora, najoptimalnije je povezati ćelije u konfiguraciji 140s5p. Idejni koncept baterije prikazan je na slici 3:

[‡] Pod konfiguracijom ćelija misli se na način povezivanja ćelija. Izražava se u formatu XsYp, pri čemu Y označava koliko je ćelija povezano u paralelu, dok X označava koliko je takvih paralelno povezanih ćelija vezano na red.

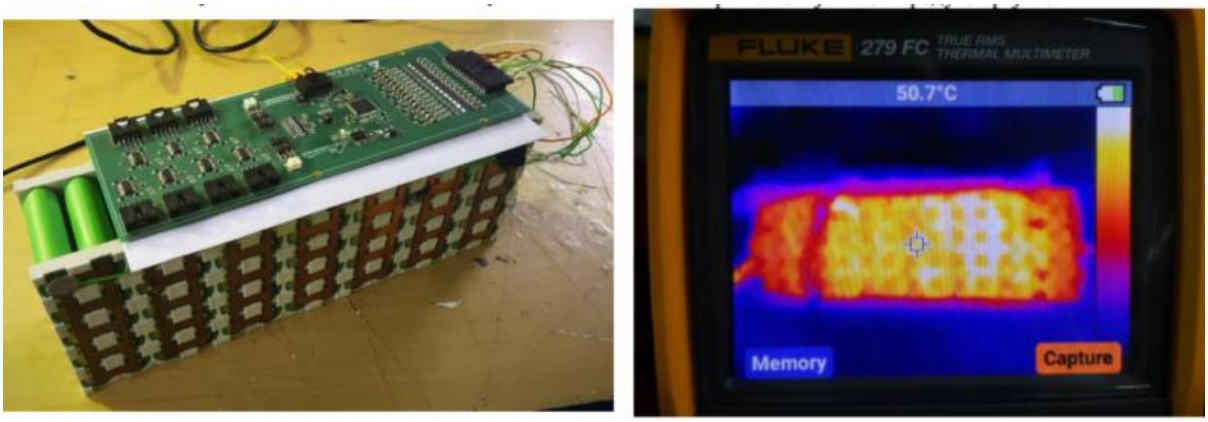
[§] Na takmičenju Formula Student dužina trke iznosi 22 km, dok je dužina jednog kruga oko 1 km.



Slika 3: Prvi idejni koncept baterije za Formula Student vozilo

U prikazanom rešenju, implementirano je aktivno hlađenje forsiranim strujanjem vazduha, među tim termalnim simulacijama pokazalo se da se ćelije neravnomerno hlade i da se samim tim ne može obezbediti ravnomerno starenje svih ćelija. Mali razmak između ćelija otežavao je strujanje vazduha te su se središnje i donje ćelije više zagrevale od spoljašnjih. Na slici 3 se mogu uočiti i pomoćni sistemi baterije poput druge iteracije *Glagol BMS*-a, konektora i izolacionih DC releja.

Testirana je jedna desetina baterije, kako bi se proverila funkcionalnost *Glagol BMS*-a i kako bi se utvrdilo ponašanje baterija pri procesu punjenja i pražnjenja. Pomoću testera baterija, simulirane su različite struje opterećenja i sniman je toplotni odziv ćelija, pri čemu su testovi vršeni na sobnoj temperaturi.



Slika 4: Ispitivanje baterije Formula Student vozila

Tokom testiranja utvrđeno je pravilno funkcionisanje *Glagol BMS*-a i pronađeni su sitni nedostaci koji su otklonjeni u sledećoj iteraciji. Utvrđeno je da se, pri istoj struji opterećenja, litijum-jonske ćelije nešto više zagrevaju pri procesu punjenja nego pri procesu pražnjenja. Najveći izazov predstavljalo je međusobno povezivanje ćelija zbog nedostatka odgovarajućeg znanja i tehnologije autora. Ćelije su međusobno spajane bakarnim šinama koje su bile zavarene za ćeliju, međutim loši spojevi na paralelno povezanim ćelijama mogli su dovesti do neravnomernog zagrevanja ćelija i bržeg trošenja istih.

Zbog prikazanih nedostataka, odlučeno je da se ne nastavi sa daljim razvojem ovog koncepta i umesto njega razvijen je i u potpunosti napravljen koncept baterije sa litijum-jon polimernim ćelijama.

2.2 Realizovana baterija električnog Formula Student vozila

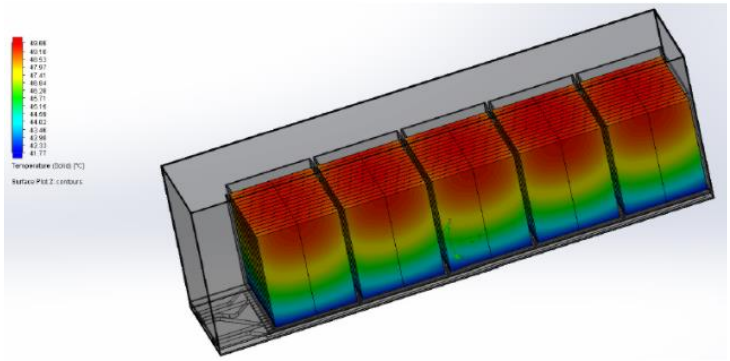
Pored litijum-jonskih ćelija, koje uglavnom dolaze u cilindričnom kućištu, na tržištu postoje litijum-jon polimerne ćelije koje imaju kućište prizmatičnog oblika i omogućavaju mnogo veće struje pražnjenja od litijum-jonskih. Manja unutrašnja otpornost ćelije i prizmatični oblik čine razvoj sistema za hlađenje lakšim. Sa druge strane, životni vek ovih ćelija je za nekoliko stotina ciklusa

kraći, te se njihova primena u komercijalnim vozilima ne preporučuje. Novi koncept baterije prikazan je na slici 5:

Slika 5: Realizovani koncept baterije za Formula Student vozilo

Sa obzirom da je maksimalna struja pražnjenja korišćenih *Melasta* ćelija veća nego kod litijum-jonskih ćelija, izabrana je konfiguracija 140s1p. Baterija se hladi aktivno, forsiranim strujanjem vode u osnovi kućišta baterije. Između ćelija se nalazi aluminijumski profil koji služi da odvodi toplotu sa ćelije ka osnovi kućišta. Terminali litijum-jon polimernih ćelija izvedeni su u obliku listova što omogućava jednostavnije povezivanje.

Prilikom testiranja sistema, potvrđeni su rezultati termalnih simulacija i dobijena su sitna odstupanja između izmerenih i simuliranih podataka, a što je najbitnije ćelije su se ravnomerno zagrevale pri svim strujama opterećenja. Kao i litijum-jonske i litijum-jon polimerne ćelije se nešto više zagrevaju pri punjenju nego pri pražnjenju.



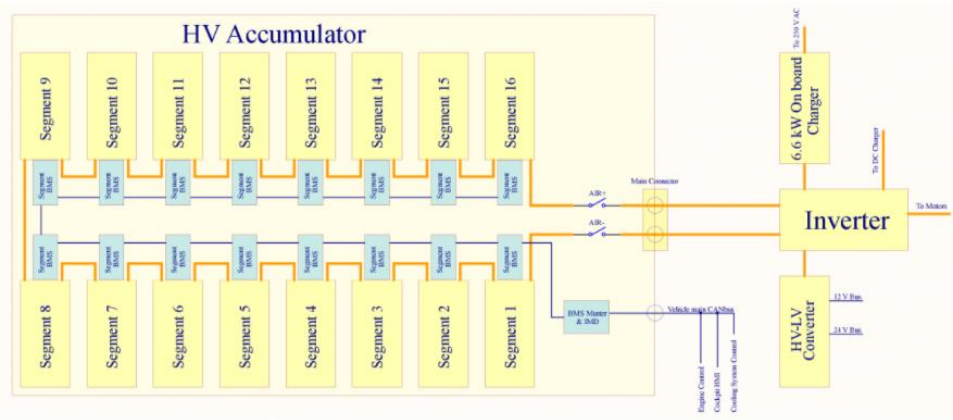
Slika 6: Simulacija hlađenja baterije

2.3 Koncept baterije električnog putničkog vozila – Rimac Battery Challenge

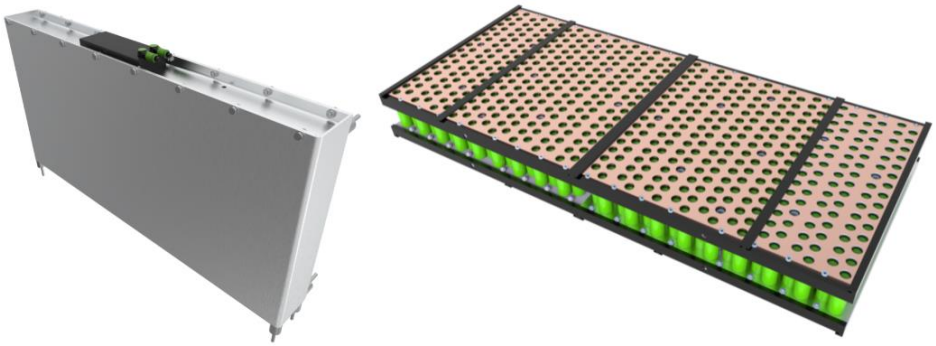
Nakon završetka rada na studentskom projektu, autori su razvili koncept baterije električnog putničkog vozila za potrebe takmičenja u organizaciji kompanije *Rimac Automobili*. Od učesnika je traženo da isprojektuju bateriju za komercijalno, putničko vozilo u formi limuzine / hečbeka koje ima autonomiju[**] od barem 500 km.

U konceptu su korišćene *Sony VTC6* u konfiguraciji 96s87p te nominalni kapacitet iznosi 92,7 kWh. Baterija je podeljena u 16 segmenata u konfiguraciji 6s87p, što omogućava lakše pakovanje unutar vozila, kao i modularnost i skalabilnost baterije za naredna vozila. Standardizacijom segmenta, proizvođač može smanjiti ukupne troškove proizvodnje baterije i omogućiti jednostavno servisiranje (tj. zamenu) ukoliko dođe do otkaza jednog segmenta. Svaki segment poseduje svoj *BMS*, koji prati napone i temperature ćelija, i sa centralnom jedinicom baterije komunicira pomoću izolovane *CAN bus* komunikacije. Na slici 8 prikazana je blok šema predložene baterije, dok je na slici 9 prikazan jedan segment baterije.

[**] Autonomija električnog vozila predstavlja koliko kilometara vozilo može preći sa jednim punjenjem baterije.

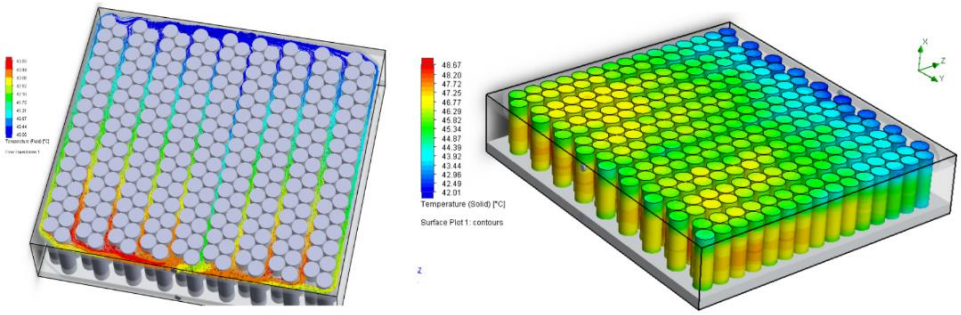


Slika 7: Blok šema baterije putničkog vozila



Slika 8: Prikaz jednog segmenta

Ćelije se međusobno povezuju bakarnim šinama postupkom laserskog zavarivanja. Implementirano je aktivno hlađenje, forsiranim strujanjem vode. Svaki segment se sastoji iz dva šuplja držača ćelija kroz koje cirkuliše voda, a svaki segment je povezan na centralni cevovod koji omogućava cirkulaciju tečnosti između baterije i hladnjaka.



Slika 10: Simulacija hlađenja jednog segmenta

3 Glagol BMS – sistem za upravljanje stanjem baterije

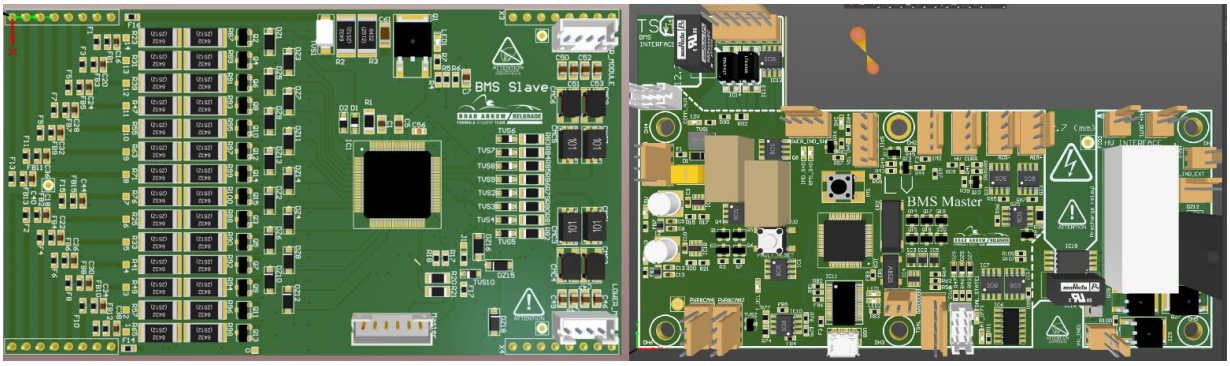
Sistem za upravljanje stanjem baterije kontinualno prati da li ćelije rade unutar dozvoljenih granica. Njegove osnovne funkcije su: merenje napona svake ćelije[††], merenje temperature ćelija, merenje napona na krajevima baterije, merenje struje opterećenja, procenu preostalog kapaciteta baterije (engl. State of Charge ili skraćeno *SOC*), procenu degradacije baterije tokom vremena (engl. State of Health ili skraćeno *SOH*), kao i nivo preostale energije (engl. State of Energy ili skraćeno *SOE*), balansiranje ćelija.

U manjim baterijama (nominalnog napona do 60 V) koristi se centralizovani *BMS*, koji se sastoji iz jednog elektronskog sklopa na kojem se nalaze sva merna kola, kao i mikrokontroler koji te podatke analizira i vrši kontrolu rada baterije. Sa druge strane, kod većih baterija koristi se distribuirani sistem koji se zasniva na *master-slave* arhitekturi. Velike baterije su izdeljene u više manjih

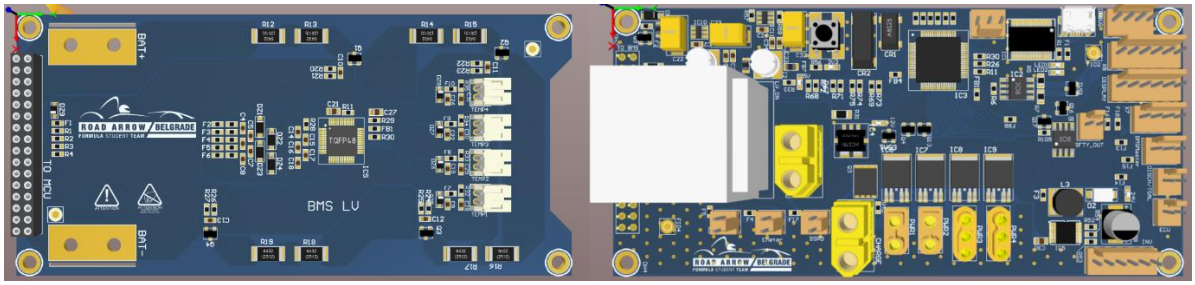
[††] Treba napomenuti da ćelije povezane paralelno, BMS tretira kao jednu ćeliju.

celina, segmenata, pri čemu svaki segment poseduje jedan *BMS slave* modul. Komunikacija između *master* i *slave* modula se može realizovati pomoću izolovanog *CAN bus*, *I2C* ili *UART* protokola. U distribuiranom sistemu, *slave* moduli predstavljaju samo merne čvorove, dok je za obradu podataka i kontrolu baterije zadužen *master*.

Kolaboracija *TIZ Glagol* i *Alfa Elektrik* ima iskustva u razvoju i distribuiranog i centralizovanog sistema kao što je prikazano na sledećim slikama. Trenutno, centralizovani sistem se može koristiti za baterije nominalnog napona 12 V, a u planu je razvoj *BMS*-a za 24 V i 48 V kao deo standardne ponude. Distribuirani sistem trenutno se može koristiti u baterijama nominalnog napona 60 – 1000 V.

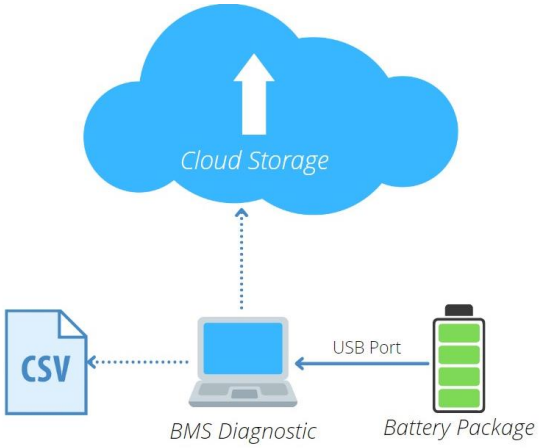


Slika 11: Slave i Master pločica distribuiranog Glagol BMS-a za visokonaponsku bateriju



Slika 12: Merna i kontrolna pločica centralizovanog Glagol BMS za niskonaponsku bateriju

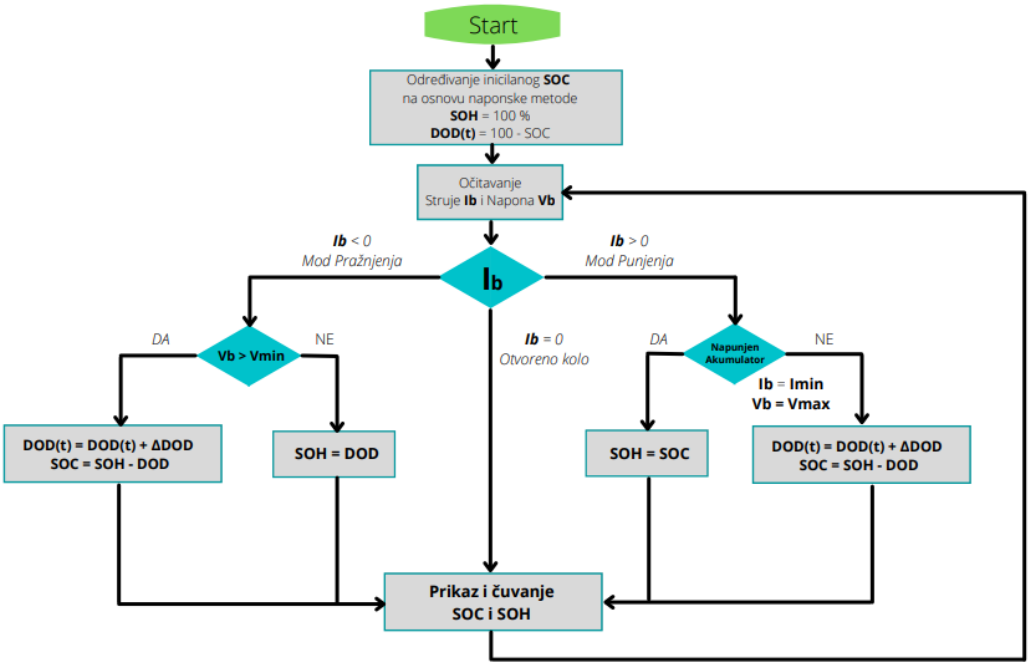
Sistem za upravljanje stanjem baterije se može povezati na PC preko serijskog porta, i pomoću posebne aplikacije prikazati trenutno stanje baterije ili prethodno prikupljene podatke. U dogovoru sa kupcem, podaci prikupljeni pomoću *Glagol BMS*-a se mogu skladištiti na *Cloud*-u, u cilju unapređivanja algoritama za procenu *SOE, SOH* i *SOC* parametara, kao i za unapređenje termičkih modela sistema baterije.



Slika 13: PC dijagnostika i Cloud

Procena preostalog kapaciteta baterije predstavlja jedan od najbitnijih proračuna koje *BMS master* obavlja. Realizovani sistem vrši estimaciju na osnovu kombinacije dve metode:

- *Metoda integracije struje* – Merena struja opterećenja se integrali tokom vremena i taj integral se oduzima od početnog kapaciteta baterije koji se dobija na osnovu druge metode
- *Metoda estimacije putem napona* – Snima se karakteristika preostalog kapaciteta u odnosu na napon baterije u praznom hodu, koja omogućava estimaciju kapaciteta baterije na početku trenutnog ciklusa rada



Slika 14: Algoritam za procenu parametara SOH i SOC

Balansiranje ćelija se vrši pasivno tako što se ćelija koja je više napunjena preko posebno dimenzionisanog otpornika povezuje sa njoj susednom ćelijom sve dok se napon obe ćelije ne izjednači.

4 GBS – modularni baterijski sistem

Iako je danas tehnologija razvoja električne baterije na bazi litijum-jonskih ćelija opšte poznata, postoji još dosta prostora za inovacije. Zahvaljujući stečenom iskustvu na dosadašnjim projektima kolaboracija *TIZ Glagol* i *Alfa Elektrik* planira da na kako domaćem, tako i na inostrastranom tržištu ponudi jedinstven koncept, univerzalnu platformu za baterije različitih naponskih nivoa i performansi.

Pri razvoju novog koncepta postavljeni su sledeći ciljevi: standardizacija mašinskih i elektronskih delova za sve baterije, poboljšanje termalnih performansi, smanjenje dimenzija, mogućnost lakog servisiranja i zamene oštećenih ćelija. Planirani koncept omogućiće da se vreme između upita kupca i predaje gotovog proizvoda skrati sa nekoliko meseci na nekoliko nedelja.

U osnovi novog koncepta leži upotreba materijala koji menjaju agregatno stanje kao osnovnog načina za hlađenje ćelija. Ćelije se nalaze u posebnim ulošcima u kojima se nalazi posebno razvijen materijal optimalnih performansi. Na ovaj način omogućava se ravnomerno i bolje hlađenje svih ćelija i znatno smanjivanje gabarita sistema za hlađenje baterije. Isti tip materijala biće korišćen i za hlađenje kontakta između ćelija i šina za povezivanje. Pasivno hlađenje će biti dovoljno za većinu aplikacija, što će pozitivno uticati na smanjenje cene u odnosu na konkurente. Konfiguracija ćelija, kao i tip ćelija u segmentu je prilagodljiv od projekta do projekta bez uticaja na vreme isporuke.

Sistem za upravljanje stanjem baterije biće zasnovan na varijanti objašnjenoj u poglavlju 3, sa malim izmenama u kolima za balansiranje kako bi se omogućilo brže balansiranje sa većom strujom za sisteme visokih performansi.

Današnje baterije na električnim vozilima ne poseduju mogućnost lakog servisiranja i zamene u slučaju oštećenja jedne ili više ćelija unutar segmenta. U većini slučajeva potrebno je zameniti ceo segment novim, a oštećeni segment se ne može popraviti i uglavnom se rastavlja, a ćelije nalaze

primenu u nekim drugim aplikacijama (takozvane *second life* ćelije). Prednost Glagol GBS ogleda se u tome što način povezivanja ćelija omogućava da se na jednostavan način može izvršiti popravka segmenta, i u slučaju kvara lako je zameniti oštećene ćelije.

Sa masovnijom upotrebom *Glagol GBS* baterije, baza podataka u *Cloud*-u omogućiće poboljšanje kvaliteta implementiranih algoritama, i povećanju životnog veka ćelija pomoću adekvatne kontrole sa strane BMS-a.

Autori se nadaju da će pouzdanost i modularnost sistema, skraćeno vreme isporuke projekta i kompetentna cena omogućiti širu primenu električnih baterija u Srbiji, što će voditi ka široj primeni obnovljivih izvora energije i elektrifikaciji transportnog sektora privrede, a sve u cilju očuvanja životne sredine.

5 Reference

[1] **Dincer I, Hamut H, Javani H**, *Thermal Management of Electric Vehicle Battery Systems*, John Wiley and Sons Inc, Chichester, United Kingdom, 2017.

[2] **Jiang J, Zhang C**, *Fundamentals and applications of lithium-ion batteries in electric drive vehicles*, John Wiley and Sons Inc, Singapore, Singapore, 2015.

[3] **Warner J,** *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design*, Amsterdam, Netherlands, 2015.

[4] **Santhanagopalan S, Smith K, Neubauer J, Gi-heon K, Pescaran A**, *Design and Analysis of Large Lithium-Ion Battery System*, Artech House, Boston, USA, 2015.

[5] **Xie Y, Shi S, Tang J, Wu H, Yu J**, Experimental and analytical study on heat generation characteristics of a lithium-ion battery, *Internation Journal of Heat and Mass Transfer, 122 (2018), 0017-9310, 884-894.*