
Batérie druhej životnosti a systém správy batérií

Martin Šušal, Ing., PhD.*

ZTS – VÝSKUM A VÝVOJ, a.s.,

Ul. Lieskovec 598/75, 018 41 Dubnica nad Váhom, Slovenská republika.

E-mail: martin.sunal@ztsvav.eu

Jaroslav Kopčan, Ing., PhD.

ZTS – VÝSKUM A VÝVOJ, a.s.,

Ul. Lieskovec 598/75, 018 41 Dubnica nad Váhom, Slovenská republika.

E-mail: jaroslav.kopcan@ztsvav.eu

Denis Benka, Ing.

ZTS – VÝSKUM A VÝVOJ, a.s.,

Ul. Lieskovec 598/75, 018 41 Dubnica nad Váhom, Slovenská republika.

E-mail: denis.benka@ztsvav.eu

Tomáš Kulháněk, Ing.

EnergyCloud, a.s.,

Studenská 50, 323 00 Plzeň, Česká republika.

E-mail: kulhanek@energycloud.cz

Jan Jandík, Ing.

EnergyCloud, a.s.,

Studenská 50, 323 00 Plzeň, Česká republika.

E-mail: jandik@energycloud.cz

Second Life Batteries and Battery Management System

Abstract: As electromobility continues to advance, there is a growing production of batteries that will eventually require recycling. One potential recycling approach involves repurposing worn yet still operational batteries in energy storage systems, providing them with a renewed functionality. Every battery assembly mandates a *Battery Management System (BMS)* to ensure proper and secure functionality. In the case of recycled cells, the *BMS* system becomes more intricate due to notable disparities in wear and, consequently, in parameters among the cells. Hence, active balancing of each cell within the assembly becomes imperative in such a setup. Furthermore, enhanced safety precautions are essential for such assemblies. The entire system must be scalable and adaptable to different numbers and configurations of battery cells from electric vehicles of various manufacturers.

Keywords: active balancing, *BMS*, electromobility, energy storage.

ÚVOD

S rastúcim rozvojom elektromobility a s tým súvisiacou výrobou batérií pre toto priemyselné odvetvie sa objavuje otázka budúcej recyklácie už vyslúžilých batérií. Batéria v elektrickom vozidle sa radí medzi jednu z najkritickejších súčastí. Pre batériách pre elektromobilitu je vyžadovaný veľmi vysoký pomer kapacity k veľkosti, či hmotnosti batérie, teda vyžadujeme čo možno najvyššiu kapacitu a čo najmenšie rozmery a najnižšiu hmotnosť batérie. Používaním elektrického vozidla sú batérie opotrebovávané a ich kapacita sa stále znižuje

a tým je obmedzovaný dojazd vozidla. Dojazd vozidla sa tak môže znížiť na veľmi nízku hodnotu, kedy sa môže stať používanie elektrického vozidla nepríjemné. Takto opotrebovaná batéria sa už na použitie vo vozidle príliš nehodí. Jednou z možností, ako tieto batérie so zníženou kapacitou naďalej používať je ich začlenenie do stacionárneho energetického úložiska. V tomto prípade nie je systém natoľko limitovaný priestorom a hmotnosťou ako elektrické vozidlo a zmenšená kapacita jednotlivých batérií je tu kompenzovaná ich celkovým počtom.

Týmto spôsobom môžeme batériám dať tzv. druhý život, kým budú definitívne vyradené [4].

1 SYSTÉM SPRÁVY BATERIÍ

Batériám sa v dnešnej dobe kladie čoraz náročnejšia úloha - poskytnúť spoľahlivé a dlhotrvajúce napájanie rôznym zariadeniam a systémom. A práve pre efektívne a bezpečné využitie batérií bola vyvinutá dôležitá technológia nazývaná „*Battery Management System*“ (*BMS*), čiže *Systém správy batérií*. Systém správy batérií hrá kľúčovú úlohu v monitorovaní a riadení stavu batérie. Pravidelne sleduje dôležité parametre, ako je napätie, teplota, prúd a stav nabitia batérií, aby získal ucelený obraz o aktuálnom stave batériového úložiska. Systém správy batérií umožňuje optimalizáciu prevádzky batériového úložiska, jeho efektívne a bezpečné využitie. Zvyčajne systém správy batérií implementuje tzv. balancovacie obvody, ktoré majú za úlohu vyrovnávať výrobné rozdiely medzi jednotlivými článkami celého úložiska [1-4].

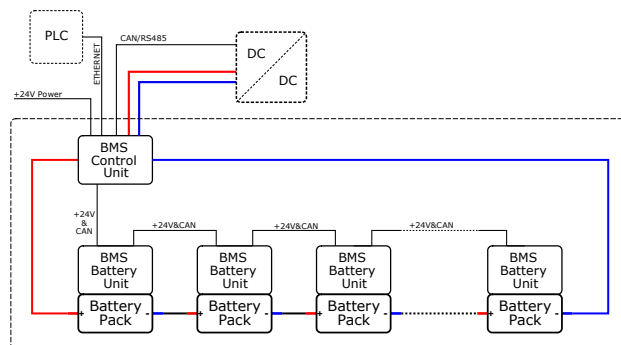
1.1 Požiadavky na systém správy batérií

Na správu batérií druhej životnosti sú kladené špeciálne požiadavky plynúce z ich opotrebovania. Batérie sú už používané a rôzne batérie môžu mať rôzny stupeň opotrebovania, a teda rôznu kapacitu, či rozdielny vnútorný odpor a ďalšie parametre. Takýto stav môže nastať aj pri rovnakom type batérií, ktoré majú rôzny stupeň opotrebovania. Tieto rozdiely musí systém efektívne kompenzovať. V praxi to znamená, že systém je vhodné vybaviť obvodmi zaisťujúcimi aktívne balancovanie jednotlivých článkov. V tomto prípade môžeme v batériovej zostave kombinovať aj články rôzneho chemického zloženia, ktoré majú rozdielne aj základné parametre, napr. napäťové hladiny. Použitie batériové články môžu byť ďalej náchylnejšie na zlyhanie, a preto je dôležité sledovať pri každom článku teplotu samostatným senzorom. Ďalej je vhodné, aby systém správy batérií druhej životnosti umožňoval variabilný počet pripojených batériových článkov, pretože zvyčajne sú batérie vo vozidle združované do modulov, ktoré nie je možné ďalej deliť a u každého výrobcu vozidla tento modul obsahuje rôzny počet batériových článkov.

2 ARCHITEKTÚRA SYSTÉMU SPRÁVY BATERIÍ

Navrhnutý systém správy batérií sa skladá z dvoch hlavných častí: riadiacej jednotky a batériových jednotiek. V reťazci je vždy jedna riadiaca jednotka a ďalej niekoľko batériových jednotiek, jedna vždy pre jeden batériový modul. Batériová jednotka sa skladá z dvoch častí, a to z dosky plošného spoja predného panelu, ktorý integruje riadiace a komunikačné časti batériovej jednotky, a ďalej až z troch monitorovacích

a balancovacích dosiek. Architektúra systému je ukázaná na obr. 1. Batériové jednotky komunikujú s riadiacou jednotkou pomocou zbernice CAN. Riadiaca jednotka zbiera namerané informácie z batériových jednotiek, s ktorými vykonáva určené výpočty a ďalej riadi batériovú zostavu a batériové jednotky. Ďalej riadiaca jednotka poskytuje napájacie napätie o veľkosti +24 V batériovým jednotkám.



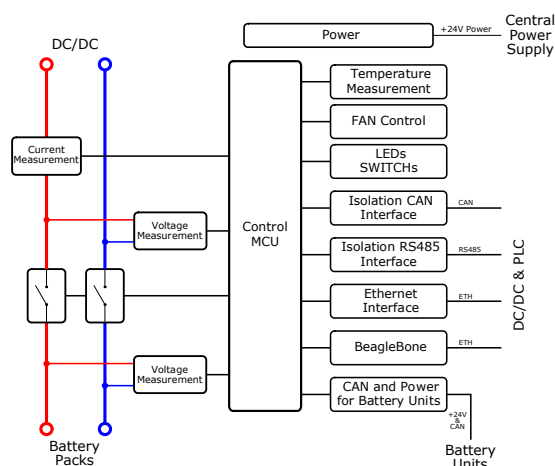
Obr. 1. Architektúra systému správy batérií

Riadiaca jednotka komunikuje s nadradenými systémami, ako je riadiaca PLC, či pripojený DC/DC menič k tejto batériovej zostave. Nadradenému systému odovzdáva informácie o batériovej zostave a jej aktuálny stav.

Počet batériových jednotiek môže byť všeobecne akýkoľvek. Prakticky je tento počet obmedzený priepustnosťou internej komunikácie CAN a potom aj celkovým napätím batériovej zostavy, ktoré by sa malo pohybovať medzi 800 V až 1000 V. Týmto je počet batériových jednotiek obmedzený na cca 16 až 20. Platí pre využitie každej batériovej jednotky maximálnym počtom článkov, teda osemnástich s napätím pohybujúcim sa do 4 V.

3 RIADIACA JEDNOTKA

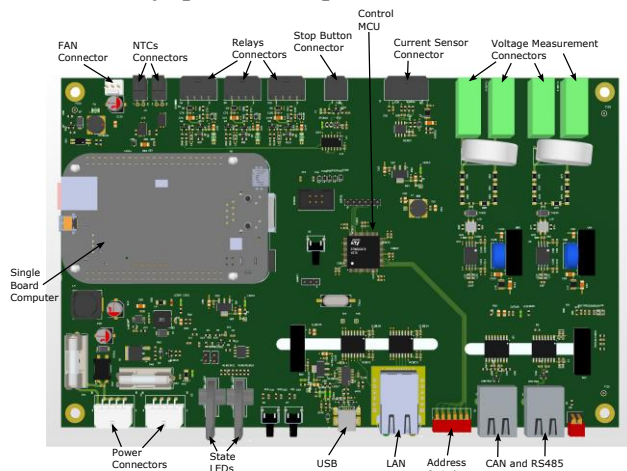
Riadiaca jednotka systému *BMS* alebo hlavná jednotka komunikuje s čiastkovými batériovými jednotkami, z ktorých zbiera informácie o jednotlivých batériových článkoch, teda hodnoty napätia a teplôt.



Obr. 2. Topológia riadiacej jednotky

Ďalej riadiaca jednotka meria celkové napätie batérovej zostavy a prúd tečúcou batérovou zostavou. Tieto hodnoty vstupujú do riadiacich podmienok a algoritmov, na základe, ktorých je riadené balancovanie jednotlivých článkov. Informácie o stave batérovej zostavy sú ďalej odovzdávané nadradenému systému, teda riadiacemu PLC či výkonovému DC/DC meniču. Na komunikáciu s nadradeným systémom môžu byť využité rozhrania CAN, Ethernet, či RS485.

Riadiaca jednotka ďalej integruje silové odpojovacie obvody, teda odpojenie kladného aj záporného výstupného pólu celej batérovej zostavy. Táto funkcia je veľmi dôležitá z hľadiska bezpečnosti a ochrany batérového úložiska, napr. pri havarijných stavoch ako je preťaženie, prehriatie či skrat.



Obr. 3. Návrh plošného spoja riadiacej jednotky

3.1 Riadiaci mikrokontrolér

Hlavnou súčasťou riadiacej jednotky je mikrokontrolér s označením *STM32G474VET6* z portfólia firmy *STMicroelectronics*, ktorý disponuje jadrom *ARM Cortex M4*. Mikrokontrolér pracuje s frekvenciou až 170 MHz a ponúka širokú škálu komunikačných a výpočtových periférií.

3.2 Komunikácia s externými systémami

Externá komunikácia je určená na prenášanie stavu batérovej zostavy okolitým systémom a systému pre riadenie celého systému energetického úložiska. Pre tieto účely riadiaca jednotka implementuje rozhrania CAN, RS485 a Ethernet. Rozhrania CAN a voliteľne RS485 sú primárne určené na komunikáciu s meničom DC/DC pripojeným k batérovej zostave. Rozhranie Ethernet je predovšetkým navrhnuté pre komunikáciu s riadiacim systémom, t. j. PLC pre riadenie úložiska. Riadiaca jednotka je tiež vybavená USB portom, ktorý umožňuje pripojenie osobného počítača s aplikáciou pre konfiguráciu systému.

3.3 Meranie prúdu

Meranie prúdu batérovej zostavy prebieha neinvazívnou metódou, pomocou tzv. prievlekového

snímača prúdu. Konkrétne je možné použiť snímač firmy *LEM* zo série s označením *HO 100-SP30*. V sérii sú dostupné snímače s nominálnym prúdom 50, 100, 150, 200 a 250 A. Je teda možné vybrať snímač s vhodným rozsahom pre danú aplikáciu. Napätový signál zo snímača je spracovávaný zosilňovačom a privedený na analógovo-digitálny prevodník v riadiacom mikrokontroléri.

3.4 Meranie napätia

Meranie napätia celej batérovej zostavy je implementované na dvoch miestach, a to na mieste pred silovými rozpínacími prvkami, teda na strane batérovej zostavy a za rozpínacími prvkami, teda na strane DC/DC meniča. Pokiaľ sú rozpínacie prvky v rozopnutom stave, je možné určiť napätie nezaťaženej batérovej zostavy aj napätie na výstupe DC/DC meniča. Ďalej je možné identifikovať, či došlo k rozopnutiu prvkov. Základnou časťou zapojenia merania napätia je precízny, galvanicky oddelený zosilňovač od firmy *Texas Instruments* s typovým označením *AMC1350*. Vstupné napätie je privedené cez napätový delič na vstup zosilňovača a diferenciálny výstup zosilňovača je pripojený k analógovo-digitálnemu prevodníku v riadiacom mikrokontroléri. Maximálne namerané napätie, a teda napätie celej zostavy, môže dosiahnuť až 1100 V.

3.5 Bezpečnostné odpojenie batérovej zostavy

V stave nečinnosti batérového úložiska, či v havarijnom stave úložiska, napr. pri prehriatí či preťažení, je nutné odpojiť silové vedenie, teda vysokonapätový výstup batérovej zostavy. Odpojenie je realizované pomocou výkonových stýkačov v kladnej i zápornej vetve výstupného silového vedenia. Rozhodnutie o zopnutí, či rozopnutí odpojovacích prvkov vydá riadiaci mikrokontrolér. Ďalšou možnosťou rozpojenia silového vedenia je manuálne pomocou stop tlačidla. Signál stop tlačidla je spracovávaný logickým obvodom nezávislým na funkcii riadiaceho mikrokontroléra. Na odpojenie, resp. pripojenie batérovej zostavy sú vybrané výkonové vysokonapätové stýkače z radu *HVC200*, *HVC300*, *HVC500* z portfólia firmy *TDK*.

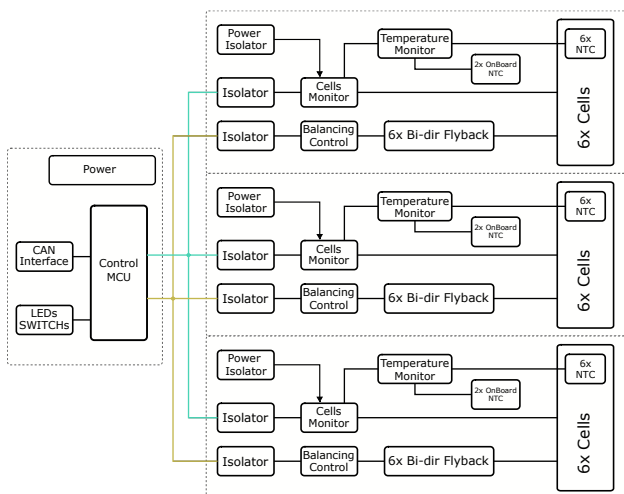
3.6 Jednodoskový počítač

V prípade, že nebude výpočtový výkon alebo funkcionálnosť riadiaceho mikrokontroléra dostatočná, je možné riadiacu jednotku vybaviť jednodoskovým počítačom *BeagleBone* s operačným systémom *Linux*. Pomocou počítača *BeagleBone* môžeme implementovať veľmi pokročilé riadiace a výpočtové funkcie a spracovávať namerané dáta pomocou pokročilých algoritmov, ako sú neuronové siete alebo *deep learning*. Ďalšou funkciou, ktorú *BeagleBone*

môže poskytovať, je implementácia webového servera. Týmto spôsobom môže byť vytvorená jednoduchá webová stránka, ktorá umožňuje správu batériovej zostavy. Namerané dáta môžu byť ukladané do databázy a graficky zobrazované obsluhu.

4 BATÉRIOVÁ JEDNOTKA

Batériová jednotka je určená na správu jednotlivých batériových článkov, ktoré sú súčasťou jednotlivých batériových modulov. Batériová jednotka sa ďalej skladá z dosky plošného spoja predného panelu a až troch monitorovacích a balancovacích dosiek plošných spojov. Doska predného panelu implementuje riadenie batériovej jednotky a komunikáciu s riadiacou jednotkou. Každá monitorovacia a balancovacia doska dokáže spravovať až 6 batériových článkov. Batériová jednotka umožňuje pripojiť až 18 batériových článkov. Jednotka meria parametre pripojených článkov, vyhodnocuje ich a odovzdáva riadiacej jednotke. Batériové jednotky s riadiacou jednotkou komunikujú pomocou zbernice CAN. Ďalej jednotka implementuje aktívny balancovací obvod pre každý článok. Jedná sa o balancovací obvod s obojsmerným *flyback* konvertorom a spoločnou napäťovou zbernicou. Balancovacia funkcia je riadená algoritmi z riadiacej jednotky.



Obr. 4. Topológia batériovej jednotky

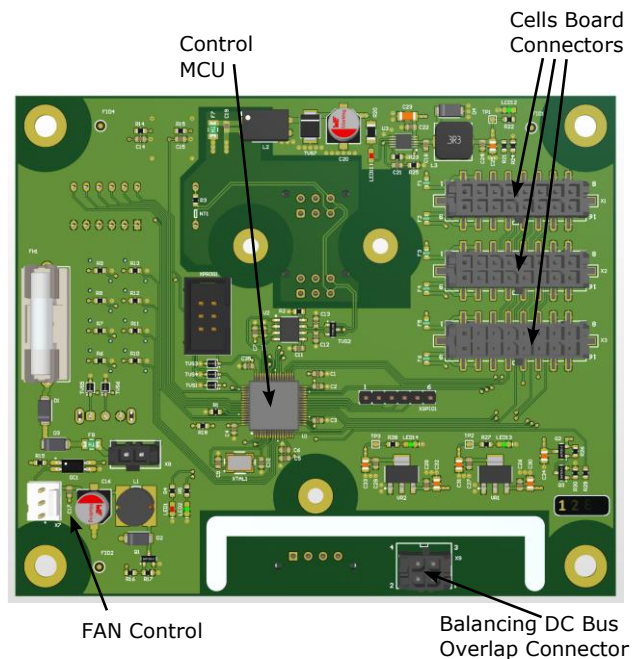
4.1 Doska predného panelu

Doska plošného spoja predného panelu je umiestnená v prednej časti batériového modulu tak, aby konektory, spínače a LED signalizácia boli prístupné z vonkajšej časti modulu. Tieto prvky sú ukázané na obr. 6.

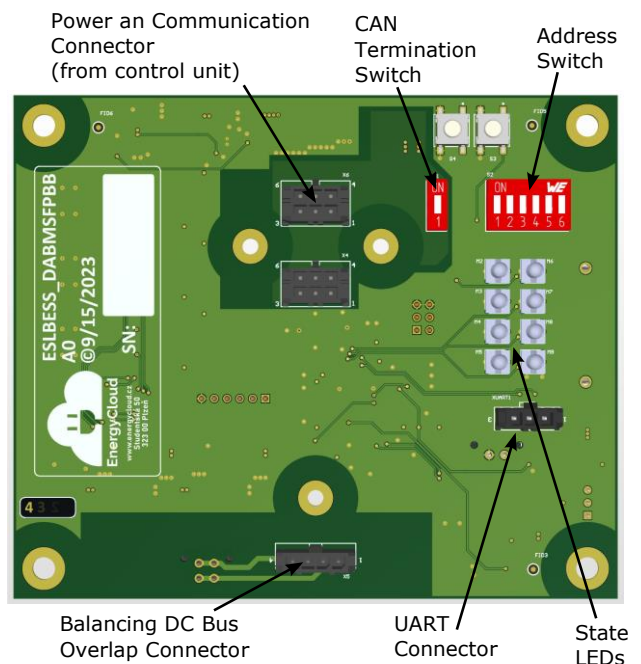
4.2 Riadiaci mikrokontrolér

Riadiaci mikrokontrolér ovláda jednotlivé časti batériové jednotky, predspracováva namerané hodnoty a odovzdáva ich riadiacej jednotke. Ďalej

prijíma príkazy z riadiacej jednotky. Ide o mikrokontrolér z portfólia firmy *STMicroelectronic* s typovým označením *STM32F072R8T6TR*, ktorý disponuje jadrom *ARM Cortex-M0*.



Obr. 5. Doska plošného spoja predného panelu - horná strana



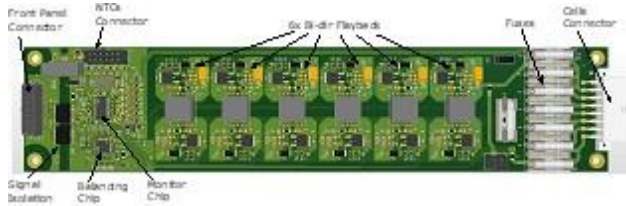
Obr. 6. Doska plošného spoja predného panelu - dolná strana

4.3 Monitorovanie batériových článkov

Jednotka musí monitorovať napätie a teplotu každého článku v batériovom module. Meranie napätia musí byť vysoko presné, pretože aj malý rozdiel napätia (napr. 10 mV) môže viesť k degradácii článkov. Monitorovanie teploty každého článku zvyšuje spoľahlivosť a akékoľvek chyby je možné detekovať rýchlejšie ako pri monitorovaní článkov ako skupiny.

Na monitorovanie napätia a teploty článkov sa používa špecializovaný integrovaný obvod *LTC6811* [6]. Tento integrovaný obvod môže monitorovať až 12 batériových článkov s rôznym chemickým zložením, a teda rôznymi napäťovými parametrami. V tejto aplikácii monitoruje iba 6 článkov. Články sú pripojené pomocou obvodov ochrany pred prepätím a *RC* filtrov na redukcii šumu a rušenia. Pre monitorovanie teploty sa používajú *NTC* snímače, ktoré sú pripojené k zodpovedajúcim pinom *LTC6811* prostredníctvom multiplexora.

Obvod pre monitorovanie môže byť napájaný buď z batériovej zostavy alebo pomocou izolovaného napájacieho zdroja, pokiaľ nie je napätie článku dostatočne vysoké.



Obr. 7. Doska plošného spoja pre monitorovanie a balancovanie batériových článkov

4.4 Balancovanie batériových článkov

Batériová jednotka dokáže balancovať 18 batériových článkov. Pre každý článok využíva samostatný obojsmerný menič typu *flyback*. Každá doska pre monitorovanie a balancovanie batériovej jednotky má 6 nezávislých balancovacích meničov. Na rozdiel od pasívneho balancovania je proces aktívneho balancovania účinnejší a vedie k lepšiemu využitiu celkovej kapacity batériových článkov aj pri výrazných rozdieloch medzi jednotlivými článkami. Obojsmerný *flyback* menič dokáže efektívne vyrovnať nerovnováhy článkov ako počas nabíjania, tak aj počas vybíjania batériovej zostavy [3, 5]. Riadenie aktívneho balancovania jednotlivých článkov zaisťuje integrovaný obvod *LTC3300-2* [7], ktorý dokáže riadiť až šesť nezávislých obojsmerných *flyback* meničov. Integrovaný obvod *LTC3300* riadi tranzistory na primárnej a sekundárnej strane *flyback* transformátorov na základe prúdu pretekajúceho primárnym a sekundárnym vinutím. Prúdy na primárnej a sekundárnej strane sú snímané pomocou *shunt* rezistorov. Primárna strana každého meniča je pripojená k príslušnému batériovému článku. Sekundárne strany meničov sú na doske prepojené paralelne, tvoriace vyvažovaciu jednosmernú zbernicu.

4.5 Jednosmerná balancovacia zbernica

Jednosmerná balancovacia zbernica paralelne prepája sekundárne strany balancovacích meničov na jednej monitorovacej a balancovacej doske. Paralelne je vždy spojených 6 sekundárnych strán meničov. Táto

zbernica je potom pripojená na 12 batériových článkov. Záporný pól balancovacej zbernice je vždy pripojený k zápornému pólu prvého článku balancovanej sady šiestich článkov. Kladný pól je potom pripojený ku kladnému pólu dvanásteho článku. Týmto spôsobom sú balancovacie zbernice prepojené aj medzi jednotlivými batériovými modulmi. Preto je na doske plošného spoja predného panelu implementovaný konektor pre tzv. prekladanie balancovacích zbernic. Toto zapojenie je kľúčové pre funkciu balancovania naprieč celou batériovou zostavou. Výnimka v tejto konfigurácii je vykonaná pre poslednú šesticu článkov v zostave, kde je kladný pól pripojený k šiestemu článku.

4.6 Prepojenie častí batériovej jednotky

Doska plošného spoja predného panelu je s jednotlivými monitorovacími a balancovacími doskami prepojená *SPI* zbernicami a napájacím napätím. Pre riadenie monitorovacieho obvodu a balancovacieho obvodu sú využívané samostatné *SPI* zbernice. Obe zbernice sú zdieľané vždy pre každý typ integrovaného obvodu na všetkých monitorovacích a balancovacích doskách, ako je zrejmé z obr. 4. Výber komunikácie s príslušným integrovaným obvodom je zaistený pomocou signálu *chip select*.

Na každej monitorovacej a balancovacej doske sú obe *SPI* zbernice galvanicky oddelené izolačným integrovaným obvodom. Napätie medzi riadiacimi obvodmi na doske predného panelu a obvodmi na monitorovacej a balancovacej doske môže dosahovať veľkosť napätia celej batériovej zostavy, teda až 1000 V. Preto je nutné galvanické oddelenie *SPI* zbernic vhodným integrovaným obvodom s dostatočnou elektrickou pevnosťou.

ZÁVER

S rastúcim rozvojom elektromobility rastie aj počet vyrábaných batérií, ktoré bude treba recyklovať. Jednou z možností recyklácie je využitie opotrebovaných, ale stále funkčných batérií v energetických úložiskách, kde im je daný druhý život. Každé také batériové úložisko musí byť vybavené systémom správy batérií alebo *BMS*. Tento systém má za úlohu monitorovať jednotlivé batérie, riadiť ich nabíjanie či vybíjanie a udržiavať úložisko v bezpečnom stave.

Navrhovaný systém počíta so špecifickými vlastnosťami už využitých batérií, hlavne s ich veľmi rozdielnymi parametrami ako kapacity, či napäťových parametrov. Z tohto dôvodu je napr. implementované aktívne balancovanie jednotlivých batériových článkov. Celý systém je škálovateľný a je možné ho prispôsobiť pre rôzny počet a konfiguráciu

batériových článkov z elektrických vozidiel rôznych výrobcov.

Pod'akovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Regenerácia použitých batérií z elektromobilov / *Regeneration of used batteries from electric vehicles, ITMS2014+: 313012BUN5, ktorý je súčasťou významného projektu spoločného európskeho záujmu (IPCEI) z názvom European Battery Innovation v operačnom programe Integrovaná infraštruktúra, kód výzvy: OPII-MH/DP/2021/9.5-34, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.*

LITERATÚRA

- [1] ZICH, J. - JANDIK, J. (2020): *Active Battery Management System for Home Battery Energy Storage*. In: 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Prague, Czech Republic, pp. 1-4, doi: 10.1109/EPE51172.2020.9269172.
- [2] VALDA, L. - KOSTURIK, K. (2015): *Comparison of Li-ion active cell balancing methods replacing passive cell balancer*. In: International

Conference on Applied Electronics (AE), Pilsen, Czech Republic, pp. 267-270.

[3] JANDIK, J. (2020): *Active Battery Management System for Home Battery*. M.S. thesis, Faculty of Electrical Engineering., University of West Bohemia, Plzen.

[4] MUKHERJEE, N. - STRICKLAND, D. (2014): *Second life battery energy storage systems: Converter topology and redundancy selection*. In: 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD), Manchester, UK, pp. 1-6, DOI: 10.1049/cp.2014.0256.

[5] MOGHADDAM, A. F. - VAN DEN BOSSCHE, A. (2019): *Flyback Converter Balancing Technique for Lithium Based Batteries*. In: 8th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), Thessaloniki, Greece, pp. 1-4, DOI: 10.1109/MOCASST.2019.8741893.

[6] *LTC6811 datasheet, Analog Devices (2023)*: Accessed on: Sep. 20, 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC6811-1-6811-2.pdf>.

[7] *LTC3300-1 datasheet, Analog Devices (2020)*: Accessed on: May. 14, 2020. [Online]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC3300-1.pdf>.