

ELEKTROMOS JÁRMŰVEKBE ALKALMAZOTT LÍTIUM-ION AKKUMULÁTOROK ÉLETTARTAMÁNAK ÉS FELHASZNÁLHATÓ KAPACITÁSÁNAK MAXIMALIZÁLÁSA FELÜGYELETI RENDSZER SEGÍTSÉGÉVEL

Szeli Zoltán *, Szakállas Gábor**

Széchenyi István Egyetem – Járműipari Kutatóközpont
(e-mail: szeliz@sze.hu; * szgabor@sze.hu**)

Abstract: Az elektromos meghajtású járművek szempontjából fontos kérdés az akkumulátorcsomag méretezése. A tervezőknek figyelembe kell venniük olyan paramétereket, mint a költség, tömeg és élettartam. Aktív cella-kiegyenlítési funkcióval ellátott akkumulátorfelügyeleti rendszer beépítésével ezek optimalizálhatók. A cikk egy ilyen akkumulátorfelügyeleti rendszer fejlesztését mutatja be, amelyet a Járműipari Kutatóközpont által fejlesztett villamos meghajtású járművekben alkalmaznak.

1. BEVEZETÉS

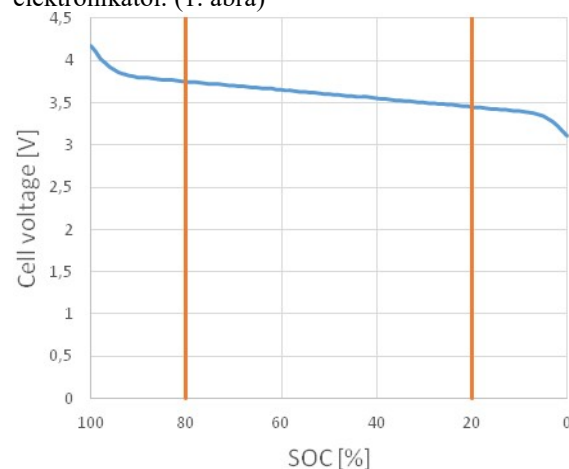
A tisztán elektromos és hibrid meghajtású járművek számának gyors növekedése a hozzá kapcsolódó ipar fejlődésének felgyorsulását is magával hozta. A nikkeltetálhibrid akkumulátorok helyett manapság egyre mérséklődő áron elérhető, különböző kémiai összetételű (vasfoszfát, mangán, titanát) lítium-ion akkumulátorokat építenek be, amelyek energiasűrűsége akár másfélszeres is lehet a régebbi típusú akkumulátorokhoz képest, jelentősen kisebb tömeg mellett. Az új típusú energiahordozók azonban új problémákat vetettek fel a gyártók számára. A lítium cellák meghatározott körülmények között képesek csak megbízhatóan üzemelni, amelyek nagymértékben befolyásolják az élettartamot. A töltési és a kisütési folyamat sem a hagyományos módon történik. Meghatározott feszültségintékek, hőmérséklet értékek, töltési és kisütési áram értékek tartoznak az egyes lítium-ion akkumulátorokhoz, amelyeket szigorúan be kell tartani. Ahhoz, hogy ezeknek a követelményeknek meg tudjunk felelni, az ilyen típusú energiátárolókat tartalmazó járműveket el kell látnunk egy úgynevezett akkumulátorfelügyeleti rendszerrel (Battery Management System – BMS), amely az egyes cellák paramétereit egymástól függetlenül képes mérni, illetve szükség esetén a rendszer működésébe beavatkozni.

2. KAPACITÁS ÉS ÉLETTARTAM

A hibrid és tisztán elektromos hajtású járművek akkumulátor élettartamát 10-15 évre becsülik. A felhasznált akkumulátorkapacitás bizonyos keretek közé való szorításával növelhető az akkumulátorok élettartama és megbízhatósága, amelyre példát az autóiipari megoldások között jelenleg is találhatunk. Jellemző érték a kapacitás 20–80% közötti kihasználása. Ez a limit a használat során az öregedés és a környezeti paraméterek függvényében, mint például a magas hőmérséklet, változtathatók. Ennek

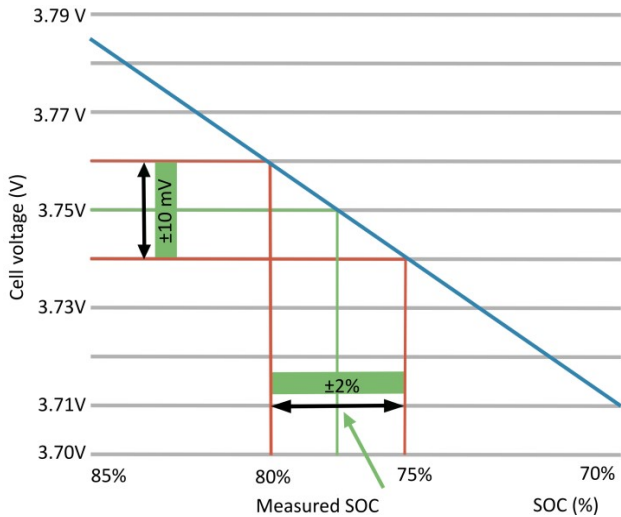
eredményeként az akkumulátorok teljes kapacitásának csak a 60%-át használjuk ki.

Az akkumulátorfelügyeleti rendszerek esetén a legnagyobb kihívást az jelenti, hogy az egyes cellákat a határokhöz a lehető legközelebb tudjuk üzemeltetni anélkül, hogy azokat átlépnénk, amit a lítium akkumulátorok lapos kisütési görbéje tovább nehezít. A működési tartományon belül a cellák feszültsége csak nagyon kis mértékben változik, ami a töltöttségi szint (továbbiakban SOC) meghatározásához rendkívül pontos méréseket követel meg a felügyeleti elektronikától. (1. ábra)



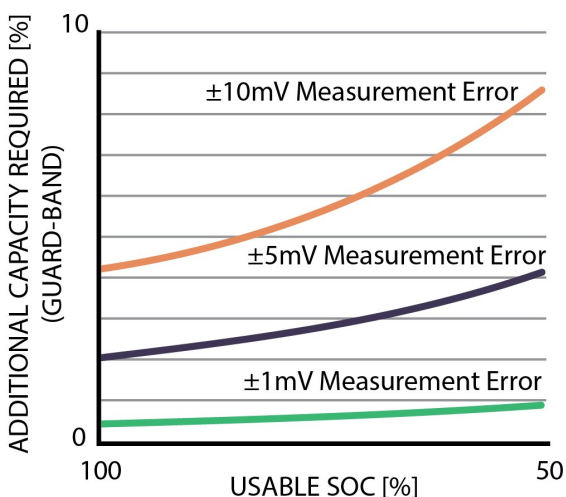
1. ábra Egyszerűsített akkumulátor kisütési görbe [1]

Az ábrán látható kisütési görbe 5mV/% (SOC) meredekséggel rendelkezik a működési tartományon belül. Egy hasonló karakterisztikájú, 20-80% között üzemelő akkumulátorcsomag nem megfelelő pontosságú feszültségmérés esetén az SOC meghatározásában nagy pontatlansághoz vezethet.



2. ábra Biztonsági tartalék szükséglet $\pm 10\text{mV}$ -os mérési hiba esetén [1]

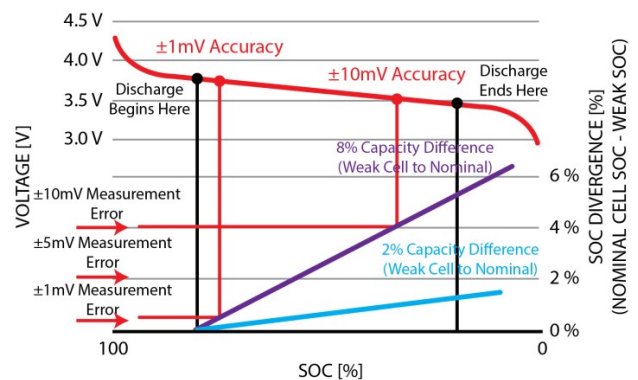
A 2. ábra egy $\pm 10\text{mV}$ mérési hibával rendelkező esetet ábrázol, ahol az elektronika által mért 3.75 V -os feszültség a valóságban egy 3.74 V és 3.76 V közötti feszültségszintet takar. Ez a töltöttségi szintet tekintve $76\text{--}80\%$ közötti tartományt jelent, vagyis a mért értékhez képest $\pm 2\%$ eltérés is lehet akár. A mérési pontatlanságból eredően szükségessé válik egy ún. biztonsági sáv meghatározása a működési tartomány határainál, hogy az eredetileg meghatározott limiteket semmilyen esetben ne lépjük át. Ez a gyakorlatban $22\text{--}78\%$ közé korlátozza a működési tartományt az eredetileg tervezett $20\text{--}80\%$ -hoz képest. Ha az eredetileg tervezett 60% -os akkumulátor kapacitást szeretnénk használni ennél a rendszernél, akkor az akkumulátorcsomag teljes kapacitásának növelése szükséges. Ez 10mV -os mérési hiba esetén a biztonsági sávot figyelembe véve 7% -os növelést jelent. Amennyiben a mérési hiba $\pm 1\text{mV}$ lenne, abban az esetben mindössze 1% -os akkumulátor kapacitás növelés lenne szükséges. (3. ábra)



3. ábra Biztonsági tartalék függése a mérési hibától [1]

Bár az egyes akkumulátor cellák kezdetben közel azonos paraméterekkel vannak összeválogatva, a nagyszámú sorosan összekötött cella az idő előrehaladtával és a töltési ciklusok számának növekedésével elkezdnek eltérni egymástól. Ez aztán az egyes celláknál különböző mértékű önkisüléshez és áramterhelhetőséghez vezet, ami a kissé eltérő cellakarakterisztikáknak és a használati körülményeknek a következménye. Idővel fokozatosan a teljes akkumulátorcsomag működési tartományát csökkenteni kell, aminek a mértékét a legrosszabb állapotú akkumulátorcella határozza meg. Ennek a problémának a kezelésére szinte minden akkumulátorfelügyeleti elektronika tartalmaz cellakiegyenlítő funkciót.

Egy, a meghatározott limiteken belül jól működő rendszer esetében kevesebbszer van szükség a cellakiegyenlítő funkció használatára, mint egy olyan esetben, ahol folyamatosan a határon működik a rendszer.



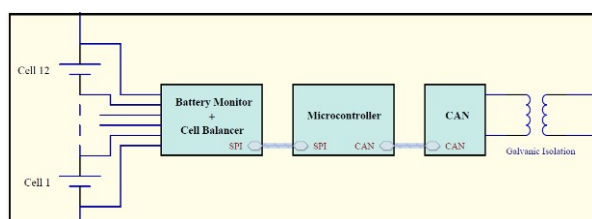
4. ábra Kapacitás különbség függése a mérési pontosságtól [1]

Erre mutat példát a 4. ábra, amely egy olyan esetet ábrázol, ahol egy kivételével azonos kapacitású cellákból épül fel az akkumulátorcsomag. Ha minden cellát 80% kapacitásra töltünk és aztán elkezdünk kisütni, idővel a kisebb kapacitással rendelkező cella lassan eltérést fog mutatni a többihez képest. A 4. ábrán két példa látható: az egyik esetben 2% , míg a másiknál 8% eltérés kapacitás különbség van a többi cellához képest. Az akkumulátorfelügyeleti rendszer feszültségmérési hibája befolyásolja a tényleges cella kapacitás meghatározását. $\pm 10\text{mV}$ mérési hiba esetén $\pm 2\%$ -os SOC eltérés is lehet a cellák között, ami akár 4% -os SOC eltérést is jelenthet. Ez a cella kapacitást tekintve több, mint 6.6% -os ($0.066 = 0.04/0.60$) eltérést jelent $22\text{--}78\%$ -os SOC tartomány esetén. Ez autóiipari felhasználás esetén, ahol az eredeti kapacitás 20% -ának elérésekor az akkumulátorcsomagot elhasználnak tekintik, jelentős kihasználatlan, vagy tévesen számított többlet kapacitást jelenthet. Az SOC pontos meghatározásához több paraméter együttes vizsgálata szükséges, de ezek közül a legmeghatározóbb a cellafeszültség-mérés. Ezen belül is az akkumulátorfelügyeleti elektronikában a referencia feszültséget előállító alkatrész pontossága a legfontosabb. A jelenleg elterjedt feszültség referenciák „bandgap” típusúak, amelyek azonban hátrányos tulajdonságaik miatt kevésbé alkalmasak hosszú távon autóiipari alkalmazásokra. A legújabb technológia, amit a Linear Technologies LTC6804

akkumulátorfelügyeleti áramköre is alkalmaz, a „sub-surface Zener” típusú feszültségreferencia, amely kiemelkedő hosszútávú stabilitást és pontosságot nyújt, és akár 1.2 mV-nál kisebb mérési hiba is elérhető vele. [1]

3. A TERVEZETT FELÜGYELETI ÉS KIEGYENLÍTŐ RENDSZER FELÉPÍTÉSE

Az elektromos járművekben található akkumulátor rendszerekben általában egymással sorba kötött lítium-ion cellákkal találkozhatunk, amelyek egymáshoz képest eltérő mértékben töltődnek fel, illetve merülnek ki. Egy ilyen felügyeleti rendszerrel ellátott akkumulátorcsomag esetében az előre meghatározott maximális és minimális cella töltöttségi szintek, esetünkben ezek feszültségértékek, elérésekor a töltési és kisütési folyamat véget ér. Az elvileg feltöltött cellák töltöttségi szintjét ellenőrizve azonban azt tapasztaljuk, hogy csak az egyiket sikerült a kívánt feszültségszintre hoznunk, a többiek ennél kisebb értéken vannak. A kimerített cellák esetében pedig pont fordított lesz a helyzet, vagyis egyetlen cella érte el a minimális feszültség szintet, a többiek magasabb értéken vannak. Az akkumulátorcsomagot tehát nem sikerült töltéskor a megengedett maximális, kisütéskor pedig a megengedett minimális töltöttségi szintre tölteni, illetve méríteni. Az eddigieket figyelembe véve azt a következtetést vonhatjuk le, hogy maximális hatékonyság elérése érdekében az összes cella együttes töltésén kívül az egyes cellák közötti különbségek kiegyenlítésére is szükség van [2].



5. ábra A felügyeleti rendszer felépítése [4]

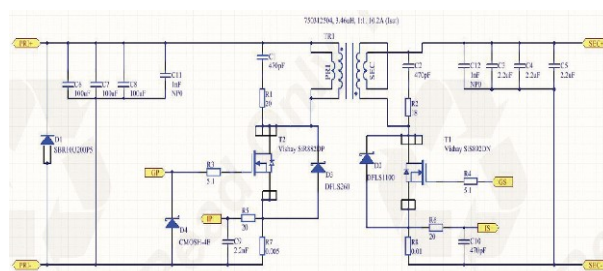
Az akkumulátorcsomagunk 12 db lítium-ion cellából épül fel, amelyeket sorosan kötöttünk össze. Minden egyes cella egy kiegyenlítő áramkörhöz csatlakozik, amelynek működése a későbbiekben részletesen is bemutatásra kerül. Ez az áramkör 12 db konvertert vezérel, amelyek a cellák közötti töltés áramoltatását biztosítják. Az egyes cellák töltöttségi szintjét és hőmérsékletét egy monitorozó áramkör segítségével mérjük, amely mind a 12 db cellát egyszerre képes figyelni. A mérési adatok feldolgozására, a vezérlési és biztonsági funkciók ellátására, valamint a járművel történő kommunikáció megteremtésére egy mikrovezérlő került beépítésre. A nyomtatott áramköri lapon belül a kommunikáció SPI - buszon keresztül valósul meg a cellakiegyenlítő, cellamonitorozó és a mikrovezérlő között, a jármű központi egységével pedig CAN - buszon keresztül alakítottuk ki a kapcsolatot, ennek érdekében egy galvanikusan leválasztott CAN-interfész került beépítésre.

4. A KIEGYENLÍTŐ RENDSZER KIALAKÍTÁSA

A cellák közötti hatékony energiáttranszfer megoldására az úgynevezett aktív kiegyenlítési módszert választottuk. A kialakítás lényege, hogy a többlettöltéssel rendelkező akkumulátorcellákból a töltést a többi cellába áramoltatjuk. A töltésátadás történhet cellából cellába, valamint cellából az akkumulátorcsomag egészébe. Mivel minden energiáttranszfer veszteségekkel jár, amelynek mértékét az alkalmazott módszer hatásfoka határozza meg, így különböző cellaszámok mellett más-más kialakításra van szükség. Nagyobb cellaszám esetén a cellából cellába történő töltésáramoltatás nem célravezető. Amennyiben több cellán keresztül jutunk el a kívánt akkumulátorcelláig, úgy a veszteségeink többszöröződhetnek. Ilyen esetekben közvetlenül az akkumulátor csomagba, valamint az akkumulátor csomagból történő töltés lehet a megfelelő választás.

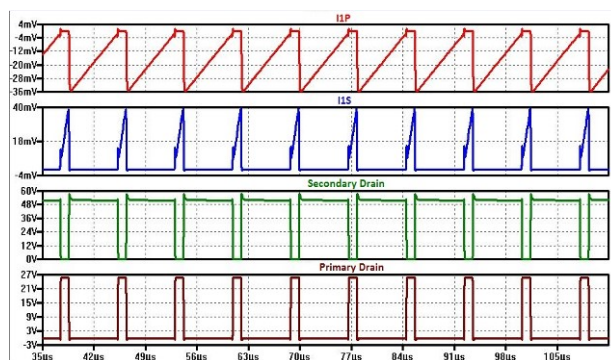
A mi esetünkben egy akkumulátorcsomag 12 db sorba kötött lítium-ion cellából áll. Egy cella névleges feszültsége 3.7 V, tehát az akkumulátorcsomag névleges feszültsége 44.4 V-ra adódik. Ahhoz, hogy a rendszerünk költségeit csökkenteni tudjuk, valamint megoldjuk a kétirányú töltésáramoltatást, olyan konvertert kellett kialakítanunk, amelynek ki- és bemeneti oldalai tetszőlegesen megválaszthatóak, valamint irányonként megvalósítják a feszültségnövelési, illetve feszültségcsökkentési funkciókat. Ennek megfelelően választásunk a flyback típusú konverterekre esett.

A rendszerünkben 12 db konverter került kialakításra, mindegyik egymástól független egységet alkot, de közös vezérlőegységgel. A vezérlő, a primer és a szekunder oldalon egyaránt, ellenállások segítségével folyamatosan méri a tekercsekben folyó áramot, így megvalósítva a bemeneti oldal vezérlését, valamint a kimeneti oldal szinkron egyenirányítását (6. és 7. ábra).



6. ábra A kiegyenlítő konverter kapcsolási rajza





7. ábra Kapcsolási hullámformák 3,2A töltőáram mellett

5. AZ ALKATRÉSZEK MÉRETEZÉSE

Az alkatrészek méretezésénél a következő paramétereket kellett figyelembe venni:

- $U_{PRI} = 3,7V$
- $U_{SEC} = 44,4V$
- $P = 16W$

Ennek megfelelően a flyback topológia kimeneti feszültségére felírható:

$$U_{SEC} = \frac{N_2}{N_1} * \frac{D}{1-D} * U_{PRI} \quad (1)$$

ahol:

- N_2/N_1 a transzformátor áttétele
- D a kitöltési tényező.

A kapcsolási frekvenciát a következő egyenletekkel határozhatjuk meg: [3]

$$f_{DISCHARGE} = \frac{S}{S + N_2/N_1} * \frac{U_{CELL}}{L_{PRI} * \hat{I}_{PRI}} \quad (2)$$

$$f_{CHARGE} = \frac{S}{S + N_2/N_1} * \frac{U_{CELL}}{L_{PRI} * \hat{I}_{SEC} * N_2/N_1} \quad (3)$$

ahol S a sorba kapcsolt cellák száma.

Figyelembe véve a vezérlőegység műszaki paramétereit, amely erősen lekorlátozza a kapcsoló tranzisztorok bekapcsolási idejének a maximumát, valamint a kereskedelmi forgalomban kapható transzformátorunkat, az áttételt $N_2/N_1=2$ -re határoztuk meg. A transzformátorunk szaturációs árama 10A, így az I_{PRI} nem haladhatja meg ezt az értéket. A szekunder oldal csúcsárama a 16W teljesítmény miatt ennél jóval kisebb lesz. Meghatározhatjuk az egyes oldalakra a töltési és kisütési áramokat, amelyeket a következőképpen számolunk: [3] kisütési áramok:

$$I_{PRI} = \frac{\hat{I}_{PRI}}{2} * \frac{S}{S + N_2/N_1} \quad (4)$$

$$I_{SEC} = \frac{\hat{I}_{PRI}}{2} * \frac{1}{S + N_2/N_1} * \eta_{DISCHARGE} \quad (5)$$

töltési áramok:

$$I_{PRI} = \frac{\hat{I}_{SEC}}{2} * \frac{S * N_2/N_1}{S + N_2/N_1} * \eta_{CHARGE} \quad (6)$$

$$I_{SEC} = \frac{\hat{I}_{SEC}}{2} * \frac{N_2/N_1}{S + N_2/N_1} \quad (7)$$

A kapcsoló tranzisztorok méretezésénél figyelembe kell venni a nyitóirányú letörési feszültséget, amely felírható:

primer oldal:

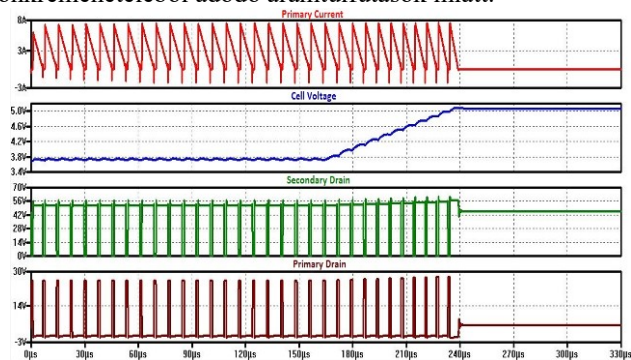
$$U_{BR(DSS)} > U_{CELL} + \frac{U_{STACK} + U_{DIODE}}{N_2/N_1} \quad (8)$$

szekunder oldal:

$$U_{BR(DSS)} > U_{STACK} + \frac{N_2}{N_1} * (U_{CELL} + U_{DIODE}) \quad (9)$$

6. MEGVALÓSÍTOTT VÉDELMEK

A megépített rendszer számos védelemmel rendelkezik. A vezérlő automatikusan lekapcsolja a kiegyenlítést, amint az IC tokhőmérséklete meghaladja a megengedett értéket. Képesek vagyunk detektálni mind a rövidzárat, mind a szakadást a primer és szekunder oldali csatlakozásoknál (8. ábra). Korlátozni tudjuk a tranzisztorok maximális bekapcsolási idejét, az esetleges mérőellenállások tönkremeneteléből adódó áramtúlfutások miatt.

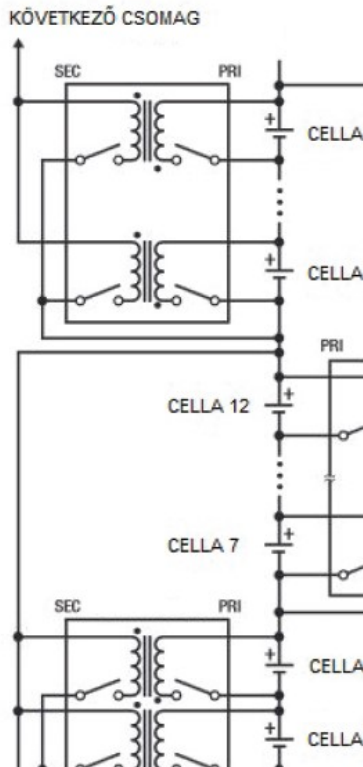


8. ábra Primer oldali vezeték szakadás védelem

7. AKKUMULÁTORCSOMAGOK KÖZÖTTI TÖLTÉSKIEGYENLÍTÉS

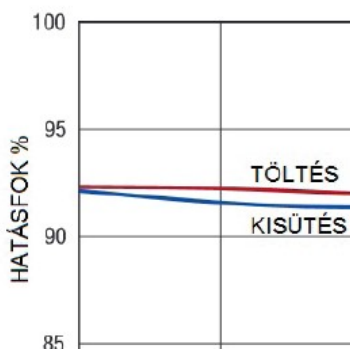
A kialakított rendszerben két részre osztjuk az akkumulátorcsomagot. Mindkét rész 6 db sorba kötött akkumulátorcellát tartalmaz. Az alsó 6 db cella szekunder oldali kivezetése ugyanazon akkumulátorcsomag egészére

(12 cella), míg a felső csomag szekunder oldali kivezetései az alsó 6 db cella pozitív felére, illetve a következő akkumulátorcsomag alsó 6 db cellájának pozitív kivezetésére csatlakoznak. Így megoldott az akkumulátorcsomagok közötti töltés kiegyenlítés (9. ábra) [3].



9. ábra A csomagok közötti töltés kiegyenlítés [3]

Lehetőségünk van csökkenteni a szekunder oldali feszültséget a szekunder oldalra csatlakozó akkumulátorcellák számának csökkentésével, azonban figyelembe kell venni az ezzel járó kiegyenlítési hatások változást (10. ábra).

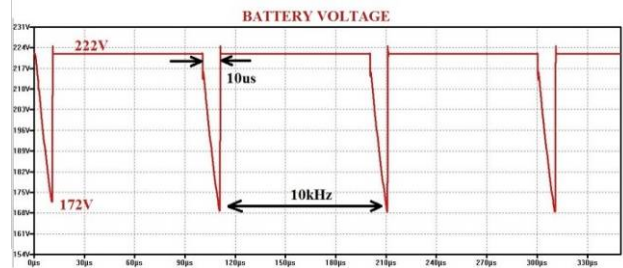


10. ábra Töltés kiegyenlítés hatásfoka, a szekunder oldalra csatlakozó cellák számának függvényében [2]

8. A CELLAMONITOROZÓ RENDSZER KIALAKÍTÁSA

A bevezetésben tárgyaltak szerint elengedhetetlenül fontos az akkumulátorcellák feszültségének minél pontosabb meghatározása. Pontosabb mérési eredményekkel nagyobb

mértékben tudjuk kihasználni az akkumulátorok kapacitását, amely alkalmazás tekintetében százalékosan kevesebb akkumulátort jelent. A járműves alkalmazásból adódóan a motormeghajtó inverter zajai nagymértékben befolyásolják az akkumulátorcellák feszültségmérését. Ez azt jelenti számunkra, hogy egy 222 V névleges feszültségű rendszernél akár 50 V-os kapcsolási tranziensek is felléphetnek 200A-es csúcsáramok mellett (11. ábra). Ebből következően egy 12 cella mérésére alkalmas monitorozó áramkörnél 10V-os közös módusú és 0,8V-os differenciális tranziensek jelentkezhetnek cellánként. Szükséges volt tehát olyan áramkör kiválasztása, amely a tipikus meghajtók kapcsolási frekvenciájának tartományában (10 – 20kHz) rendkívül jó közös módusú elnyomással rendelkezik. [5]



11. ábra Motormeghajtó inverter kapcsolási tranziens

Választásunk ezek alapján egy olyan áramkörre esett (LTC6804), amely a következő paraméterekkel rendelkezik: [6]

- 12 db akkumulátorcella feszültségmérése
- 1.2 mV maximum teljes mérési hiba
- 290 µs az összes cella mérési ideje
- szinkronizált feszültség és árammérés
- 16-bites Delta-Sigma ADC programozható szűrővel
- 4 µA fogyasztás alvó üzemmódban
- ISO-26262 szabványnak való megfelelés (járművekre vonatkozó funkcionális biztonsági szabvány).

9. ÖSSZEFOGLALÁS

A kétirányú aktív kiegyenlítéssel és megfelelő zajnyomású, pontos mérési lehetőséggel kialakított eszköz olyan védelmet és felügyeletet nyújthat járműveink akkumulátor csomagjainak, amellyel hosszabb élettartamot, nagyobb használható kapacitást érhetünk el. A kommunikáció kialakítása lehetővé teszi a jármű irányító berendezésével szabványos CAN interfészen keresztül kapcsolat kiépítésére. A kialakított rendszer tesztelés alatt áll, így a valós mérési eredményeket még nem tudtuk a szimuláció eredményeivel összevetni. A korábban megépített felügyeleti rendszerhez képest az új változattól működés és hatékonyságbeli javulást várunk. A tervezés során szem előtt tartottuk a biztonságos működés feltételeinek a megvalósítását, valamint a robusztus kialakítást.



12. ábra A tervezett felügyeleti rendszer

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetet mondunk az EFOP-3.6.2-16-2017-00016 "Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában" projektben nyújtott támogatásért.

Köszönetet mondunk az EFOP-3.6.2-16-2017-00016 "Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában" – projekt támogatásáért.

HIVATKOZÁSOK

- [1] **G. Zimmer** (2013, July). "Precision cell measurements add value to battery management". Embedded Know-how [Online]. pp.18-20. Available: <http://embedded-know-how.com/article/1527/precision-cell-measurements-add-value-to-battery-management>
- [2] **J. Drew** "Active Cell Balancer Extends Run Time and Lifetime of Large Series-Connected Battery Stacks", LT Journal of Analog Innovation, Vol. 23. No 1. pp. 3-7, April 2013.
- [3] **Linear Technology**, "Battery Cell Balancers", LTC3300-1 datasheet, June 2013 [Revised Dec. 2013]
- [4] **J. Douglass** "Battery Management Architectures for Hybrid/Electric Vehicles", Electronic Product Design, pp. 9-10, march 2009.
- [5] **M. Kultgen** "Managing high-voltage lithium-ion batteries in HEVs", Inf., News, Bus. Strategy Electron. Des. Eng., Vol. 54. No 7. pp. 45-52, April 2009.
- [6] **Linear Technology**, "Multicell Battery Stack Monitor", LTC6804-1/LTC6804-2 datasheet, Oct. 2013 [Revised Oct. 2016]
- [7] **E. Horváth, P. Kőrös, I. Lakatos, P. Dely**, "Development of individual information technology systems of experimental vehicles", in 10th Jubilee IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI 2015), Timisoara, Romania, 2015, pp. 489-493., (ISBN:978-1- 4799-9910-1)
- [8] **I. Lakatos, P. Kőrös, V. Nagy**, "Operation and applicability issues of powertrain models in electric vehicle development", in 10th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, Senigallia, Italy, 2014, (IEEE) Paper 6935610, 6 p, (ISBN:978-1- 4799-2772- 2)
- [9] **Sz. Kocsis, I. Lakatos, Cs. Szuromi**, "Battery diagnostic system design for electric and hybrid vehicles", in 24th International Conference on Mechanical Engineering, Deva, Romania, 2016, pp. 254-257.
- [10] **Sz. Kocsis, I. Lakatos**, "Thermal effect analysis of lithium-polymer batteries in electric vehicles during discharging process", in IFFK, Budapest, Hungary, 2015, Paper 10.
- [11] **T. Péter, I. Lakatos**, "Hybrid model of vehicle and traffic for combined dynamic analysis", in International Journal of Heavy Vehicle Systems 24:(2) pp. 97-112. (2017)

