

Napetostno izenačevanje akumulatorjev v ultralahkih letalih na električni pogon

Jure Tomažič¹, Tine Tomažič², Andrej Žemva³

¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, Ljubljana
E-pošta: jure@pipistrel.si

Povzetek. V akumulatorskih paketih, ki se uporabljajo v vozilih in letalih na električni pogon, je večje število celic vezanih zaporedno, kar povzroča problem napetostne neizenačenosti celic. Težave nastanejo tako zaradi proizvodnih toleranc kapacitete samih akumulatorjev, kot tudi zaradi različne hitrosti staranja posameznih celic. Zato je zaradi varnosti uporaba t.i. upravljalnikov akumulatorjev nujna. Med samim polnjenjem in praznjenjem akumulatorjev je treba napetosti celic izenačevati in jih tudi varovati pred prenapolnjenjem in čezmernim izpraznjenjem. V prispevku so opisane osnovne metode za merjenje napetosti posameznih celic ter aktivne in pasivne metode napetostnega izenačevanja celic. Načrtan in izdelan je bil prototip upravljalnika akumulatorjev s pasivno metodo izenačevanja napetosti s posebnim poudarkom na majhni teži sistema in enostavnostjo prehoda na serijsko izdelavo. Preizkušen je bil v letalu na električni pogon Pipistrel Taurus Electro. Komentirani so rezultati prvega preizkusa upravljalnika na 22-celičnem akumulatorskem paketu z zmogljivostjo 40 Ah.

Ključne besede: električni pogon, ultralahka letala, akumulatorji LiPO, napetostno izenačevanje, upravljanje akumulatorjev

Battery-cell balancing in electric-powered ultralight aircraft

Extended abstract. The paper describes battery-cell charge balancing and voltage measurement circuits suitable for use in electric-powered ultralight aircraft. The rapid development process of high energy density battery cells, particularly those based on LiION, LiPO and LiFE, has enabled ultra-light aircraft to use permanent-magnet synchronous motors (PMSP) instead of internal-combustion engines, eliminating gas emissions and greatly lowering the emitted noise. In order to keep the current at a reasonably high level, the propulsion system runs at relatively high voltages ranging from 80 V to 400 V. The battery packs therefore consist of a large number of series-connected cells. Due to the high tolerances in battery-cell production, the problem of voltage imbalance between the cells arises. To allow for battery-cell balancing, monitoring, overcurrent and overtemperature protection, Battery Management Systems (BMS) have been introduced.

In the paper two types of cell-balancing techniques are described, the active and passive. They differ in the way the excessive cell energy is dissipated. Active balancers use the excessive energy of an over-charged cell to charge the lower-charged cells, while the passive methods simply radiate the excessive power in form of heat. The active switched capacitor (2.1) and inductive (2.2) cell methods are presented, however, their implementations have proven to be physically too large and heavy for use in ultra-light aircraft. From the weight and cost perspective, passive balancing method implementations are superior. Due to high voltages in the battery pack, the balancer actuators and voltage measurement circuits must be able to cope with great electric-potential differences. Strategies using gate-drive transformers (3.2), optocouplers (2.4) and high-voltage analog multiplexers (2.5) are discussed. Though each technique has its own advantages and disadvantages, the use of analog multiplexers proves to be

the best solution, giving the lowest size and weight of the BMS.

The authors present the design of a battery-cell balancer used in an avionics BMS application, based upon the passive cell-discharge balancing technique. Special consideration was given to the thermal design and low weight. The prototype of the cell balancer was tested on a Kokam LiPO battery pack, consisting of 22 series-connected cells of 40 Ah charge each. The selected 400 mA balancing current proved to be sufficient to compensate for any voltage imbalances in the battery back.

Keywords: electric propulsion, ultralight aircraft, LiPO batteries, cell balancing, battery management system (BMS)

1 Uvod

Evropska unija sprejema vedno strožje predpise o oddanih emisijah in hrupu tako cestnih vozil kot tudi letal [1-2]. Letališča so pogosto v neposredni bližini mest, kjer lahko lokalne oblasti vsilijo še hujše omejitve, predvsem glede oddanega hrupa, saj tudi motorji z notranjim zgorevanjem z najboljšimi izpušnimi sistemi pogosto ne izpolnijo zahtev. Poleg ekološke čistosti je zahteva po nizkem oddanem hrupu glavna motivacija pri razvoju električnega pogona za letala.

Zgradba pogonskega dela električnega sistema v letalu na električni pogon je enaka kot v cestnih vozilih, ki se uporabljajo že več let. Električni motor, največkrat enosmerni krtačni ali novejši sinhronski, s trajnimi magneti, se napaja iz akumulatorskega paketa. Ustrezni elektronski krmilnik skrbi za regulacijo hitrosti vrtenja

motorja. Vozila imajo navadno vgrajen tudi polnilnik akumulatorjev, ki odvzema tok ali iz eno- ali iz trifaznega omrežja.



Slika 1: Zgradba pogonskega sistema

Image 1: Structure of the electric propulsion system

Glavno vodilo pri razvoju ultralahkih letal na električni pogon je majhna teža sestavnih delov, zato so celice svinčevih ali metal - hibridnih akumulatorjev neprimerne, ker so težke. Šele komercialna dosegljivost litijevih in litij - polimer akumulatorjev je omogočila razvoj ultralahkih letal na električni pogon, saj tovrstni akumulatorji že dosegajo energijsko gostoto do 200 kWh/kg, to so trenutno edina primerna rešitev za uporabo v ultralahkih letalih.

Akumulatorski paketi v električnih vozilih in letalih so sestavljeni iz velikega števila zaporedno vezanih celic, kar je potrebno za doseganje visokih napetosti (tipične napetosti se gibljejo med 80 V in 400 V, odvisno od moči pogonskega motorja), toda veliko število zaporedno vezanih akumulatorjev povzroča vsaj dva večja/glavna problema:

1. Verjetnost odpovedi akumulatorskega paketa je N-krat večja, kot je verjetnost odpovedi ene njegove celice. Pri odpovedi ene celice v paketu je treba zamenjati celoten paket, kar je povezano z visokimi stroški, saj problema ni mogoče rešiti samo z zamenjavo slabe celice, ker bo nova zaradi toleranc in staranja imela drugačne karakteristike kot ostale v paketu.

2. Ob povečani verjetnosti odpovedi ene celice, ki je posledica razmeroma visokih toleranc pri njihovi izdelavi, neenakomerne porazdelitve temperature in različnih hitrosti staranja celic nastane še problem napetostne neizenačenosti celic, ki vedno nastane pri zaporedni vezavi celic; vzporedni sistemi se izenačujejo samodejno.

Pri svinčevih in NiMH celicah izenačevanje napetosti ni problematično, saj prenašajo prenapolnjenost brez trajnih posledic, napetost se jim izenačuje samodejno prek podaljšanja časa polnjenja; prenapolnjene celice oddajajo odvečno energijo v obliki toplote. Litijevi akumulatorji so bolj izpostavljeni problemu napetostne neizenačenosti, saj celice ne prenašajo prenapolnjenosti in zato takšen pristop ni mogoč.

V nadaljevanju članka so predstavljene različne metode napetostnega izenačevanja in merjenja napetosti celic v akumulatorskih paketih visokih napetosti. Jedro članka je predstavitev pasivnega napetostnega izenačevalnika in sistema za nadzorovanje akumulatorjev, ki je bil preizkušen v ultralahkem jadralnem letalu z električnim pogonom za dviganje, Pipistrel Taurus Electro.



Slika 2: Pogonski del letala Taurus Electro

Image 2: Propulsion system of the Pipistrel Taurus Electro ultralight aircraft

2 Upravljanje akumulatorskih paketov

Visokonapetostni akumulatorski paketi so sestavljeni iz večjega števila zaporedno vezanih celic. Napetost, ki jo izmeri polnilnik ali porabnik energije takega paketa, je:

$$U_P = \sum_{i=1}^N U_{Ci}, \quad (2.1)$$

kjer se U_C lahko nahaja med:

$$U_{CL} < U_C < U_{CH}, \quad (2.2)$$

kjer sta U_{CL} in U_{CH} spodnja in zgornja napetostna meja delovanja ene celice. Polnilnik ali porabnik lahko meri samo skupno napetost vseh celic. Tako se bodo pri praznjenju celice z nižjo relativno kapaciteto v paketu, prekomerno izpraznile:

$$U_{Ci} < U_{CL}. \quad (2.3)$$

Pri polnjenju pa se bodo prenapolnile

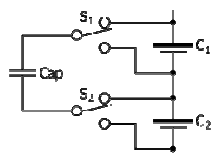
$$U_{Cj} > U_{CH}. \quad (2.4)$$

Iz tega sledi, da je treba v paketih s serijsko vezanimi celicami njihove napetosti izenačevati. Poleg samega izenačevanja je treba napetosti akumulatorjev nadzirati, da ne presežejo skrajnih mej, ter meriti temperaturo samih celic in s tem zaznati morebitno pregrevanje [3]. Naprava, ki izvaja vse te naloge, se imenuje upravljalnik akumulatorjev (angl. BMS –

Battery Management System). Za doseganje obeh ciljev morata biti v upravljalniku dva sklopa, in sicer za merjenje napetosti in za izenačevanje napetosti oziroma pretakanja naboja. Obema sklopoma je skupen problem premostitve potencialnih razlik.

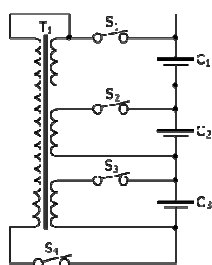
Metode napetostnega izenačevanja delimo na aktivne in pasivne. Razlikujejo se po načinu odvajanja odvečne energije [4]. Pri aktivnih metodah, ki imajo visok izkoristek, a hkrati zahtevajo zapleteno zgradbo vezij, se energija v prenapoljenih celicah porabi za polnjenje bolj praznih. Pri pasivnih metodah, ki imajo ničelni izkoristek, omogočajo pa enostavna vezja za njihovo realizacijo, pa se odvečna energija porabi v obliki toplote na ohmskih uporih.

Metoda preklopnega kondenzatorja je aktivna metoda izenačevanja napetosti celic. Pri tej metodi se naboj prek preklapljanja kondenzatorja s polprevodniškimi stikali (MOSFET) pretaka iz bolj na manj napolnjeno celico, realizacija te metode pa zahteva obsežno mrežo polprevodniških stikal in ustreznih gonilnikov, ki mora biti sposobna preklapljanja kondenzatorja med poljubnima celicama [5]. Poleg tega pri tej metodi nastane problem upočasnjene izenačevanja, saj se, ko sta si napetosti celic dokaj blizu, pretoči le malo naboja iz ene celice na drugo, kar upočasnjuje proces izenačevanja.



Slika 3: Izenačevanje s preklopnim kondenzatorjem
Image 3: Switching-capacitor cell-balancing method

Pri aktivni induktivni metodi napetostnega izenačevanja uporabljamo za premostitev potencialnih razlik transformator z več sekundarnimi navitji [6]. Prek stikal je vsaka celica vezana na svoje sekundarno navitje, medtem ko je primarno navitje vezano na celotni akumulatorski paket, katerega energija se pri prenapoljenih celicah uporabi za polnjenje šibkejše celice v celotnem paketu.

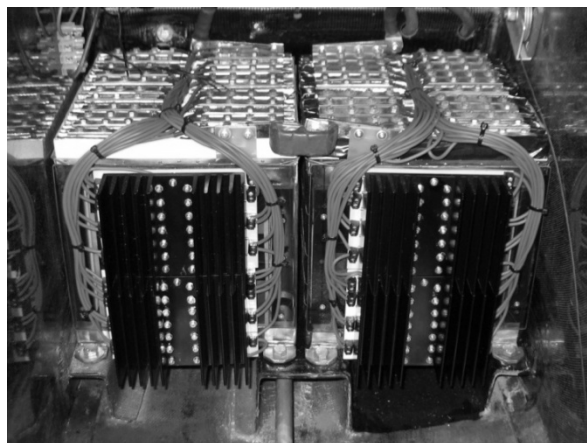


Slika 4: Induktivna metoda izenačevanja
Image 4: Inductive cell-balancing method

Sklenitev stikala na sekundarnem navitju povzroči magnetenje jedra, čemur sledi sklenitev stikala na primarnem navitju, pri čemer se jedro razmagnetni in

energija steče v celoten akumulatorski paket. Pri premalo napoljeni celici se energija celotnega paketa uporabi za njeno polnjenje po nasprotnem postopku. V nasprotju z metodo preklopnega kondenzatorja opisana metoda ne trpi za problemom upočasnjene izenačevanja, ko so si napetosti celic blizu [7].

Z uporabo pasivne metode se vsa odvečna energija celic pretvori v toploto. Uporabljata se dve metodi, in sicer metoda premostitve polnilnega toka polnjenja in metoda praznjenja celic. Obe predvidevata enako zgradbo močnostnega dela in se razlikujeta zgolj po njunem krmiljenju. Pri prvi metodi premostimo celoten polnilni tok celice skozi upor, ko se slednja napolni na nazivno napetost. Prednost te metode je, da vezje ne potrebuje centralnega krmiljenja. Metoda praznjenja celic uporablja upore za praznjeje bolj napoljenih celic in s tem uravnava manj napolnjene. V nasprotju s prejšnjo metodo poteka proces izenačevanja v celotnem času polnjenja in ne samo pri koncu [8].



Slika 5: Pasivni balanserji, vgrajeni v letalo
Image 5: Passive BMS mounted directly on the battery pack at the back of the aircraft

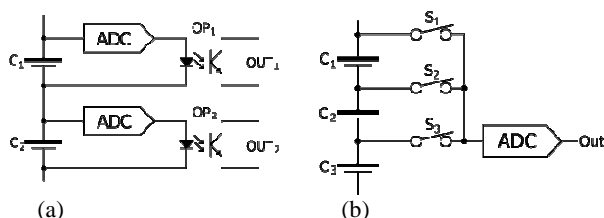
Izenačevalniki z aktivnimi metodami izenačevanja so zaradi svoje fizične velikosti neprimerni za uporabo v ultralahkih letalih. Izenačevalniki s premostitvijo polnilnega toka zahtevajo veliko površino za odvajanje generirane toplote, saj se pri koncu procesa izenačevanja na njih porabi vsa moč iz polnilnika [9]. Pasivni izenačevalniki z metodo praznjenja celic se pokažejo kot dobra rešitev; kljub manjšemu izkoristku sistema v primerjavi z aktivnim izenačevalnikom se njihova uporaba za letalske aplikacije zlahka upraviči. Realizirati jih je moč z razmeroma preprostimi vezji, ki vzamejo malo prostora, imajo majhno težo in so hkrati robustna, kar je pri letenju, kjer nastopajo tako turbulence kot vibracije iz samega pogonskega motorja, ključnega pomena.

Merjenje napetosti individualnih celic je prav tako izpostavljeno problemu premoščanja potencialnih razlik, razen pri uporabi pasivne metode premostitve polnilnega toka, pri kateri se napetost celice zgolj omeji

in zato ne potrebuje centralnega zbiranja podatkov o napetosti individualnih celic.

Pri uporabi induktivnega izenačevalnika se lahko transformator sam uporabi za premostitev potencialne razlike z dodatnim sekundarnim navitjem [6]. Pri drugih metodah ni mogoče uporabiti dela izenačevalnika za premoščanje potencialnih razlik; uporabiti je treba bodisi optosklopnike ali analogne multiplekserja.

Uporaba optosklopnikov zahteva, da ima vsaka celica svoj analogno-digitalni pretvornik in pripadajočo precizno napetostno referenco. Metoda ima prednost v sposobnosti premoščanja visokih potencialnih razlik, a je potrebno vezje preveliko in tudi cena vezja za takšno merjenje je previsoka.

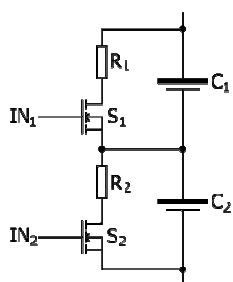


Sliki 6 a) in b): Premoščanje potencialnih razlik
Images 6 a) and b): Methods for copping with large potential barriers

Analogni multiplekserji omogočajo uporabo zgolj enega analogno-digitalnega pretvornika in napetostne reference, s čimer se realizacija vezja za meritev napetosti celic močno poenostavi, saj napetosti celic meri isti pretvornik in je zato relativna napaka meritve med celicami odvisna zgolj od neidealnosti multiplekserja.

3 Pasivno izenačevanje (metoda praznjenja celic)

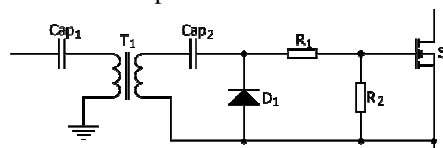
Med polnjenjem je treba celice, katerim napetost hitreje raste kot drugim, prazniti oziroma zmanjšati tok polnjenja, kar dosežemo z uporabo zaporedne vezave polprevodniškega (MOSFET) stikala in ohmskega upora, na katerem se porabi odvečna energija polnilnika [9].



Slika 7: Pasivna metoda izenačevanja napetosti
Image 7: Passive method of cell balancing

Krmilni signali stikal MOSFET morajo imeti ustrezne napetostne nivoje; za N-to celico mora biti

tranzistor v neprevodnem stanju krmiljen s signalom napetosti $N \cdot U_C$, v prevodnem stanju pa s signalom napetosti $N \cdot U_C + U_{THR}$. Generiranje takih signalov predstavlja problem premostitve potencialov. Ponudijo se tri možnosti in sicer uporaba signalnega transformatorja, optosklopnika ali visoko napetostnega analognega multiplekserja. Signalni transformatorji se uporabljajo za premoščanje visokih potencialnih razlik izmeničnih ali digitalnih signalov. Z detektorjem na izhodu je moč doseči ustrezni krmilni signal MOSFET tranzistorja. Zahteva po majhni parazitni induktivnosti navitij signalnega transformatorja omejuje debelino izolacijske plasti žic, zaradi česar so signalni transformatorji primerni za premoščanje potencialnih razlik le do napetosti 1 kV.



Slika 8: Uporaba transformatorja za premostitev potencialne razlike in poganjanje MOSFET tranzistorja
Image 8: Using a signal transformer to drive a MOSFET transistor

Optosklopniki z izhodnim tranzistorjem tipa PNP imajo za prednost enostavno vezavo in majhne fizične velikosti, ob tem pa dajejo izolacijsko trdnost do nekaj kV, zato so primerni za gradnjo izenačevalnikov akumulatorskih sistemov zelo visokih napetosti. Analogni demultiplekserji v obliki integriranih vezij dajejo fizično najmanjšo in najbolj robustno rešitev, njihovo območje delovanja pa je zaradi CMOS tehnologije izdelave omejeno na okvirno 100 V. Kljub razmeroma majhnemu napetostnemu območju delovanja jih je z uporabo dodatnih premostitvenih vezij mogoče vgraditi v sisteme za napetosti reda kV.

Največja slabost pasivnih izenačevalnikov je v tem, da z njimi lahko prenapolnjene celice le praznimo. Pri polnjenju krmilnik identificira celice z višjo napetostjo in vključi izenačevalnike in s tem njihovo praznjenje. Iz dejstva sledi, da je uporaba takšnega izenačevalnika v praznilnem ciklu akumulatorja nezaželena, saj bi se celice z več shranjenega naboja prilagajale tistim z manj naboja. Učinkovitost sistema s pasivnim izenačevanjem v praznilnem ciklu izenačevanja bi bila zelo odvisna od karakteristike celic v akumulatorskem paketu in bi bila pri manjšem številu celic z relativno manjšo kapaciteto zelo nizka.

4 Gradnja prototipa

Najprej je bil zgrajen upravljalnik (izenačevalnik je temeljil na pasivni metodi izenačevanja) za 24 celic akumulatorjev LiPO kot prototip. Pri dimenzioniranju aktuatorske stopnje je velikost izenačevalnega toka ključnega pomena, ker je odvisna od:

1. pričakovane tolerance kapacitete celic, s katero je določen naboj, ki ga mora izenačevalnik kompenzirati, in

2. velikosti polnilnega toka, s katero je določen čas polnjenja oziroma čas, ki ga ima izenačevalnik na voljo za kompenzacijo.

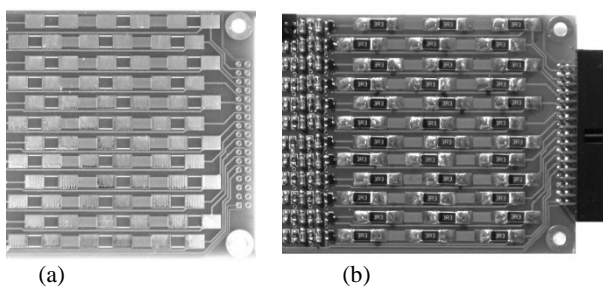
Za izbrane celice podaja proizvajalec toleranco 2 %, uporabljen pa je bil polnilnik akumulatorjev s polnilnim tokom 6 A. Pri danih podatkih je najnižji srednji tok izenačevanja:

$$I_B = \frac{2 \cdot C_{CELL} \cdot \tau_c}{I_{CHARGE}} = 266 \text{ mA} . \quad (4.1)$$

Z razmeroma visokim varnostnim faktorjem je bil izbran srednji tok izenačevanja 400 mA, kar zadostuje za kompenzacijo 6,5-odstotne razlike naboja med celicami v enem polnilnem ciklu.

Za uporabo v letalski aplikaciji so bili uporabljeni trije zaporedno vezani 3,3 Ω SMD upori moči 1W in P-kanalni tranzistorji MOSFET SI2351DS. Posebna pozornost je bila namenjena razporeditvi uporov; nameščeni so na obeh straneh tiskanega vezja, in sicer z $\frac{1}{4}$ zamika od aktuatorja do aktuatorja, kar omogoča enakomerno razporeditev temperature tiskanega vezja in hkrati optimalno odvajanje izgub. Uporabljeno je bilo tudi prisilno hlajenje v obliki 40 mm ventilatorja, nameščenega naposredno za tiskanino.

Za zaščito tranzistorja in analogno-digitalnega pretvornika pred morebitno napačno priključitvijo ali pred napačnim zaporedjem priključitve celic so bile v vezje dodane tudi zenerjeve diode. Dodaten RC-člen s časovno konstanto $\tau = 10^{-5}$ s filtrira visokofrekvenčne motnje pred vhodom AD-pretvornika.



Sliki 9 a) in b): Razporeditev uporov na tiskanem vezju
Images 9 a) and b): Placement of balancing resistors on the PCB

Problem premostitve potencialnih razlik je bil rešen z uporabo integriranega vezja LTC6802-1 proizvajalca Linear Technology, ki vsebuje visoko napetostne analogne multiplekserje, tako za krmiljenje aktuatorskih tranzistorjev MOSFET, kot tudi za analogno-digitalni pretvornik. LTC6802-1 omogoča tudi kaskadno vezavo

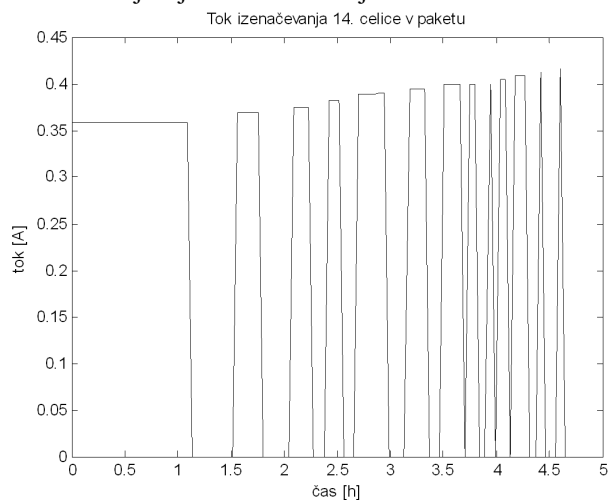
večih stopenj, kar omogoča gradnjo akumulatorskih paketov višjih napetosti.

Za mikrokrmilnik je bil izbran 16-bitni mikroprocesor Microchip DSPIC30F2020, katerega programski del vsebuje vse potrebne rutine za izenačevanje napetosti, zaščito pred čezmernim izpraznjenjem in določanje preostale količine shranjenega naboja (state-of-charge). Pri izbiranju celic, ki se bodo praznile, upošteva program 5 mV histerezo napetosti celic. Mikrokrmilnik se nahaja na ločenemu tiskanemu vezju in uporablja kompatibilen vmesnik CAN in RS-232 za komunikacijo z zunanjim svetom.

5 Rezultati

Izenačevalnik je bil uporabljen na akumulatorskem paketu iz 22 celic SLPB100216216H proizvajalca Kokam. Celice imajo kapaciteto 40 Ah in nazivno območje delovanja 3,40–4,15 V, iz varnostnih razlogov pa na začetku polnilnega cikla niso bile popolnoma prazne, temveč so bile napolnjene na okoli 20 % nazivnega naboja. Pred začetkom polnjenja je bilo relativno odstopanje napetosti celic znotraj intervala 50 mV; celica z najmanjšo napetostjo je imela napetost 3,511 V, celica z najvišjo napetostjo pa 3,558 V. Celice so bile priklopljene na upravljalnik akumulatorjev po zaporedju naraščajočih napetosti.

Med polnilnim ciklom je bila opazovana aktivnost aktuatorjev. Slika 5.1 prikazuje aktivnost aktuatorja 14. celice v paketu, ki se je pokazala kot celica, ki je zahtevala največji tok izenačevanja.



Slika 10: Aktivnost aktuatorja 14. celice
Image 10: Activity of the balancer of the 14th cell in the battery pack

Iz aktivnosti najbolj (I_M) in najmanj (I_L) aktivnega aktuatorja je mogoče oceniti relativno odstopanje kapacitete celic:

$$e = \sum_0^{T_{CH}} (I_M - I_L) \Delta T = 1,18 \text{ Ah}, \quad (5.1)$$

kar pomeni 2,75 % nazivne kapacitete celice. Iz aktivnosti samih akuatorjev je moč sklepati o relativni kapaciteti posamezne celice v paketu; celice z manjšo kapaciteto potrebujejo več izenačevalnega naboja. Energija, ki se je porabila na najbolj aktivnem akuatorju izenačevalnika, je bila:

$$A = \sum_0^{T_{CH}} I_M U_C \Delta T = 4,13 \text{ Wh}. \quad (5.2)$$

Med samim preizkusom je bila nadzorovana temperatura posameznih akuatorjev izenačevalnika. Izkazalo se je, da je bila temperatura po plošči tiskanega vezja razmeroma enakomerno porazdeljena; najvišja izmerjena temperatura ja znašala 73°C z 8°C najvišjim relativnim odstopanjem med posameznimi akuatorji.

6 Sklep

Kljub opisanim prednostim aktivnih metod izenačevanja napetosti je uporaba pasivnih metod v aviacijskih aplikacijah nujna predvsem zaradi majhne teže in majhne fizične velikosti. V članku je predstavljen princip delovanja upravljalnika akumulatorjev s pasivno metodo izenačevanja napetosti, ki se je izkazala za uspešno; zgrajen je bil prototip upravljalnika napetosti, dimenzioniran za uporabo na akumulatorskih paketih s 24 celicami kapacitete 40 Ah. Tok izenačevanja celic je odvisen od relativne tolerance kapacitete celic in od njihovega polnilnega časa. Z upoštevanjem 2-odstotne tolerance je izračunani 400 mA izenačevalni tok zadoščal za izravnavo napetosti na 22-celičnem akumulatorskem paketu v času polnjenja 4,5 h. Nadzorovana je bila aktivnost akuatorjev izenačevalnika in pokazalo se je, da bi za uporabljene akumulatorje zadoščal že za 30 % manjši tok izenačevanja, torej 280 mA. Zaradi razmeroma velike moči, ki se porabi na uporih, je bila potrebna termalna optimizacija sistema; upori so bili porazdeljeni na tiskanem vezju v razmikih po ¼ njihove dolžine, uporabljeno pa je bilo tudi prisilno hlajenje. Temperatura najbolj aktivnega akuatorskega dela v izenačevalniku ni presegla 75°C, kar je s stališča odpornosti in staranja komponent popolnoma sprejemljivo.

Literatura

- [1] EASA regulation [EC] No 216/2008, Article 6
- [2] DFS, Bekanntmachung von Lufttüchtigkeitsforderungen für aerodynamisch gesteuerte Ultraleichtflugzeuge, Nachrichten für Luftfahrer Teil II, 51. Jahrgang, NfL II 17/03, 30. Januar 2003,

- [3] A. Jossen, V. Späth, H. Döring, J. Garche, Reliable battery operation – a challenge for the battery management system, *Journal of Power Sources*, Volume 84, Issue 2, December 2008, pp. 283–286.
- [4] J. Cao, N. Schofield, A. Emadi, Battery Balancing Methods: A Comprehensive Review, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, September 3-5 2008, pp. 1–6.
- [5] A. Baughman, M. Ferdowsi, Analysis of the Double-Tiered Three-Battery Switched Capacitor Battery Balancing System, *Vehicle Power and Propulsion Conference*, September 6-8 2006, pp. 1–6.
- [6] W. Rissler, Boost battery performance with active charge-balancing, *EE Times-India*, July 2008, pp. 1–5.
- [7] J. Jang, J. Nam, J. Yoo, Cell Balancing Circuits Implementation with DC/DC Converters Using Cuper Capacitor Equivalent Circuit Parameters, *Vehicle Power and Propulsion Conference*, September 9-12 2007, pp. 646–653.
- [8] S. Wen, Cell balancing buys extra run time and battery life, *Analog applications journal*, 1Q 2009, pp. 14–18.
- [9] A. Mills, S. Al-Hallaj, Simulation of passive thermal management system for lithium-ion battery packs, *Journal of Power Sources*, Volume 141, Issue 2, March 2005, pp. 307–315.

Jure Tomažič je diplomiral leta 2009 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Trenutno je zaposlen kot mladi raziskovalec v gospodarstvu v podjetju Pipistrel. Ukvarja se z električnimi sistemi s področja električnih in hibridnih pogonskih sistemov

Tine Tomažič je diplomiral leta 2007 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Trenutno je zaposlen kot mladi raziskovalec v gospodarstvu v podjetju Pipistrel. Ukvarja se z modeliranjem, vodenjem in simulacijo s področja aviacije.

Andrej Žemva je diplomiral, magistriral in doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani v letih 189, 1993 in 1996. Njegova raziskovalna in razvojna dejavnost obsega avtomatsko načrtovanje digitalnih elektronskih vezij in sistemov, vgrajene sisteme ter sočasno načrtovanje strojne in programske opreme.