

Innowacyjne magazyny energii wyposażone w funkcję monitorowania i nadzoru. Wybrane zagadnienia

Streszczenie. W artykule zaprezentowano wybrane praktyczne realizacje magazynów energii dla potrzeb systemów bazujących na odnawialnych źródłach energii zbudowanych w oparciu o ogniwa litowo-jonowe (ang. Li-ion) pochodzące z częściowo wyeksploatowanych baterii trakcyjnych, pozyskanych z samochodów elektrycznych. Omówiono rozwiązania pozwalające na ich monitorowanie, nadzór i archiwizację wyników badań za pomocą komputera PC, smartfonu lub tabletu. Zaprezentowano wybrane wyniki pomiarów napięć na poszczególnych ogniwach dla różnych etapów pracy.

Abstract. The paper presents selected practical implementations of energy storage facilities for systems based on renewable energy sources based on Li-ion cells derived from partially used traction batteries from EV. The article describes solutions allowing for their monitoring, supervision and archiving of test results using a typical PC, smartphone or tablet. Selected results of voltage measurements on particular cells for various stages of operation are presented. (**Innovative energy storage with monitoring and supervision functions. Selected Issues**)

Słowa kluczowe: magazyn energii, ogniwo litowo jonowe, bateria trakcyjna, BMS, „drugie życie baterii trakcyjnych”

Keywords: energy storage, Li-ion cell, traction battery, BMS, the second life of an EV battery

Wstęp

Planowany na najbliższe lata znaczny wzrost liczby samochodów elektrycznych i hybrydowych typu plug-in stworzy problem z recyklingiem i ewentualnym wykorzystaniem ogniw pochodzących z częściowo wyeksploatowanych baterii trakcyjnych. Problem ten był inspiracją podjęcia projektu, którego zasadniczym celem jest ich zagospodarowanie umożliwiające ich dalszą eksploatację. W niniejszym artykule zaprezentowano wybrane zagadnienia związane z projektem i praktyczną realizacją modeli magazynów energii dla potrzeb systemów bazujących na odnawialnych źródłach energii wyposażonych w innowacyjne systemy zarządzania pracą magazynów energii BMS (ang. Battery Management System) z funkcjami wyrównywania napięć, monitoringu i nadzoru. Do ich realizacji zastosowano ogniwa pochodzące z wycofanych z eksploatacji baterii trakcyjnych samochodów elektrycznych i hybrydowych. Dodatkowo zostały opracowane i wykonane stanowiska pomiarowo badawcze do prowadzenia procedur selekcji komponentów baterii, testowania zastosowanych systemów wyrównywania napięć, monitoringu i nadzoru oraz bieżących pomiarów i badań długofalowych modeli magazynów energii.

W ostatnich latach odnotowano duży wzrost liczby nowych mikroinstalacji fotowoltaicznych. Stało się tak za sprawą taniejących podzespołów do ich budowy jak i możliwości oddawania energii do sieci. Niedopasowanie okresów podaży i popytu na energię w takich instalacjach prowadzi do dużych przepływów energii pomiędzy prosumentem, a siecią energetyczną. Dodatkowo, zwłaszcza w okresie letnim, często występuje sytuacja, w której nie ma możliwości oddania energii do sieci z powodu jej zbyt wysokiego napięcia. Taka sytuacja jest spowodowana coraz większą ilością podpiętych instalacji typu on-grid [1]. Coraz częściej mówi się o konieczności wyposażenia takich instalacji w magazyny energii. Wykorzystanie w takich magazynach nadal sprawnych ogniw, wycofanych z eksploatacji z samochodów elektrycznych po spadku ich pojemności do 70-80% lub pochodzących z samochodów powypadkowych, wydaje się być rozwiązaniem tanim i jednocześnie przyjaznym dla środowiska.

W chwili obecnej akumulatory bazujące na technologii litowo-jonowej odgrywają kluczową rolę w najnowszych rozwiązaniach wykorzystywanych w transporcie. Aktualnie

stanowią najlepsze rozwiązanie zapewniające bardzo wysoką wydajność w odniesieniu do gęstości energii i mocy, żywotności oraz niezawodności [2], [3] i [4]. Badania wskazują, że akumulatory o pojemności 70% ich pierwotnej pojemności po zakończeniu eksploatacji w pojazdach, mogą być ponownie wykorzystane do magazynowania energii, zastosowań związanych z obciążeniem, w tym dostaw energii elektrycznej, systemów sieciowych czy też integracji odnawialnych źródeł energii. [5], Tematyka ta jest przedmiotem licznych dyskusji, projektów i publikacji. [6], [7] i [8]. Jej komercjalizacja wymaga zastosowania szybkich procedur predykcji ogniw najczęściej litowo-jonowych, zaprojektowania i wykonania systemów BMS oraz zaprojektowania i praktycznej realizacji rodziny magazynów energii o różnych napięciach wyjściowych i pojemnościach.

Realizacje praktyczne

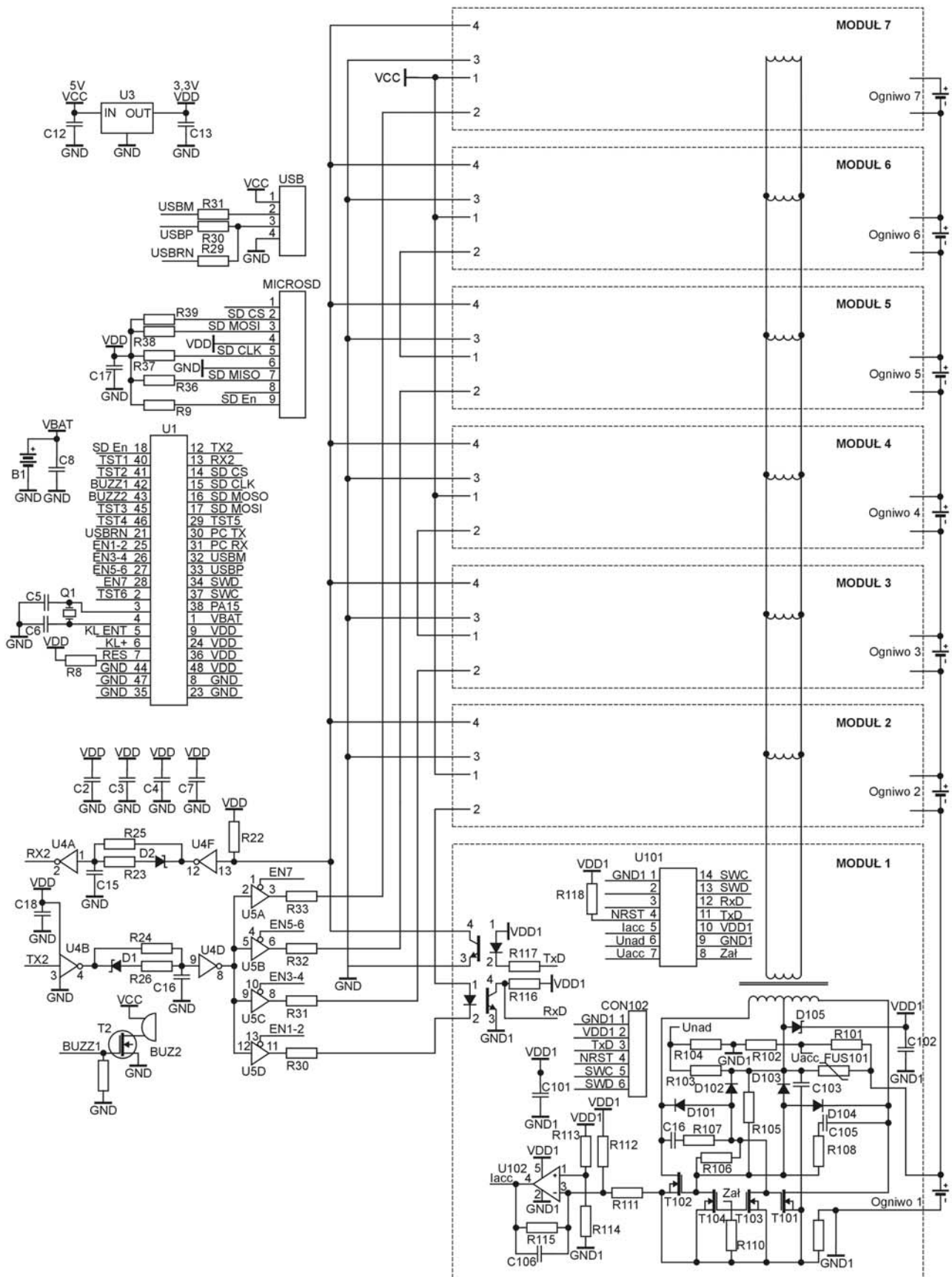
Pierwszy z magazynów „24 V” powstał na bazie siedmiu ogniw litowo-jonowych stosowanych w samochodach Mitsubishi i-MiEV, Citroen C-Zero, Peugeot iOn. Podstawowe parametry znamionowe ogniw wchodzących w jego skład to:

- Pojemność 50 Ah,
- Napięcie nominalne 3,75 V,
- Zakres napięcia roboczego 2,75 do 4,1 V,
- Wymiary 171 x 44 x 111 mm,
- Masa 1,65 kg.

Ogniwa te były wyeksploatowane do około 70 % pojemności znamionowej. Wygląd zewnętrzny modelu magazynu energii pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Praktyczna realizacja modelu magazynu energii „24 V”



Rys. 2. Uproszczony schemat pierwszego magazynu energii wyposażonego w system wyrównywania napięć rozbudowany o funkcję monitorowania i nadzoru, dedykowany dla siedmiu ogniw litowo-jonowych pracujących w połączeniu szeregowym.

W magazynie zastosowano opracowany i praktyczny zrealizowany aktywny system wyrównywania napięć rozbudowany o funkcje monitorowania i nadzoru. Jego uproszczony schemat przedstawiono na rysunku 2

Na powyższym rysunku przedstawiono uproszczony schemat systemu wyrównywania napięć rozbudowany o funkcję monitorowania i nadzoru dedykowany dla siedmiu ogniw litowo-jonowych pracujących w połączeniu szeregowym. W skład systemu wchodzi siedem modułów aktywnego wyrównywania napięć. Dodatkowo każde ogniwo jest nadzorowane przy pomocy mikrokontrolera, który mierzy napięcie na nim, oraz prąd wpływający albo wypływający z niego podczas procesu wyrównywania napięć. Mikrokontroler może także włączyć albo wyłączyć układ wyrównywania napięcia nadzorowanego ogniwa. Siedem układów nadzoru połączonych jest poprzez separację galwaniczną z mikrokontrolerem U1. Mikrokontroler ten realizuje następujące funkcje:

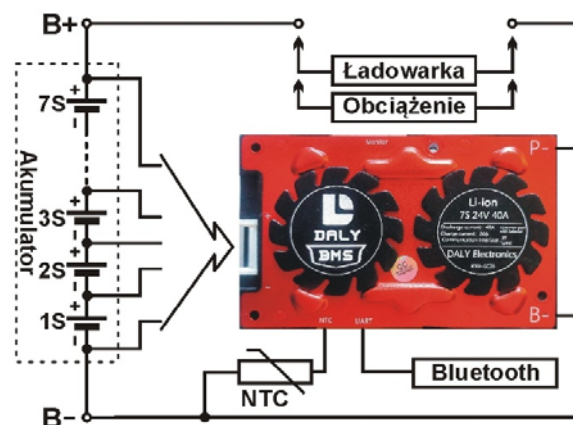
- inicjuje (co zadany czas) pomiar prądu i napięcia wykonywany przez mikrokontrolery nadzoru;
- transmituje wykonane pomiary uzupełnione informacją o czasie rzeczywistym do komputera PC z wykorzystaniem łącza USB lub zapisuje je na karcie pamięci microSD/SD w celu ich archiwizacji;
- mierzy wartości napięć na poszczególnych ogniwach i w przypadku różnic większych od 15 mV załącza system wyrównywania napięć;
- gdy prądy wyrównywania napięć spadną poniżej założonej wartości wyrównywanie zostaje wyłączone.

Drugi z magazynów to również magazyn „24 V” bazujący na tych samych ogniwach co magazyn pierwszy. Do jego realizacji wykorzystano komercyjny system zarządzania baterią BMS (Battery Management System). Podstawowe jego parametry to:

- Napięcie akumulatora: 24V 7S
- Maksymalny ciągły prąd rozładowania: 40A
- Marka: DALY
- Typ ogniwa: litowo-jonowe (Li-ion)
- Maksymalne napięcie ładowania: 29,4V
- Wyprowadzenia: Przewód 2x6mm² (AWG10)
- Maksymalny prąd ładowania: 20A
- Pobór prądu w czasie pracy: 10mA
- Prąd balansowania ogniw: 30mA +/-5 mA
- Wymiary: 100x65x13mm
- Waga: 143g

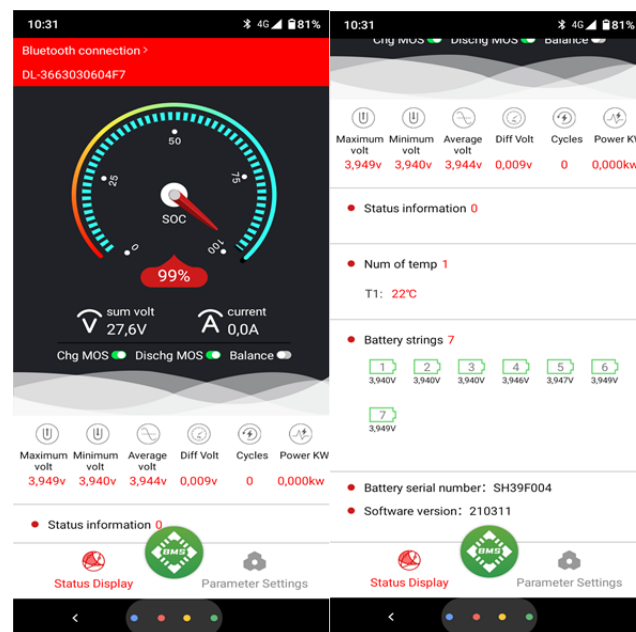
Zastosowany moduł BMS służy do zabezpieczenia magazynu przed zwarcim, przeladowaniem oraz nadmiernym rozładowaniem i wyposażony jest w funkcję pasywnego wyrównywania napięć poszczególnych ogniw. Przeznaczony jest wyłącznie do pakietów ogniw litowo-jonowych. System daje możliwość programowania parametrów w oparciu o uniwersalny asynchroniczny nadajnik-odbiornik UART (ang. Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) lub stosownej aplikacji mobilnej z wykorzystaniem bezprzewodowego standardu komunikacji Bluetooth (BT). W zestawie dostarczany jest również Moduł BT, który również pozwala na programowanie podstawowych funkcji, oraz monitoring parametrów. Po połączeniu z modułem BT dostępny jest również ciągły monitoring napięcia, stanu ładowania i innych parametrów na urządzeniu mobilnym (Android, APS). System dzięki wyposażeniu go w termistorowy czujnik temperatury typu NTC (ang. Negative Temperature Coefficient) daje możliwość nadzoru temperatury w wybranym punkcie magazynu energii. Był on w projekcie zastosowany również do realizacji jednego z komputerowo wspomaganymi stanowisk pomiarowych dla potrzeb prowadzenia testów i badań zwłaszcza długofalowych wraz z możliwością ich

archiwizacji. Jego uproszczony schemat aplikacyjny pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Uproszczony schemat blokowy drugiego magazynu energii

Na rysunku 4 pokazano zrzuty z ekranu smartfону wykorzystanego w eksperymencie prezentujące przykładowe wyniki pomiarów. Więcej informacji na ten temat dostępne jest w poz. [9].



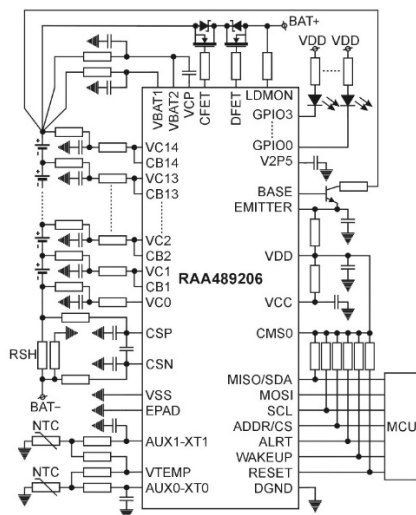
Rys. 4. Zrzuty z ekranu smartfону wykorzystanego w eksperymencie

Trzeci z magazynów to magazyn „48 V” bazujący na czternastu ogniwach litowo-jonowych gromadzących na początku eksploatacji energię 1,1 kWh, stosowanych w samochodach Toyota Prius+.

Podstawowe parametry znamionowe ogniwa wchodzących w jego skład to:

- Pojemność 25 Ah
- Napięcie nominalne 3,667 V
- Zakres napięcia roboczego 3,00 do 4,1 V
- Wymiary 148 x 26,5 x 91 mm
- Masa 0,71 kg.

Ogniwa te były wyeksploatowane do około 75 % pojemności znamionowej. Do jego realizacji zastosowano rozwiązanie bazujące na dedykowanym układzie scalonym typu RAA489206, którego uproszczony schemat aplikacyjny pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Uproszczony schemat aplikacyjny dedykowanego układu scalonego typu RAA489206

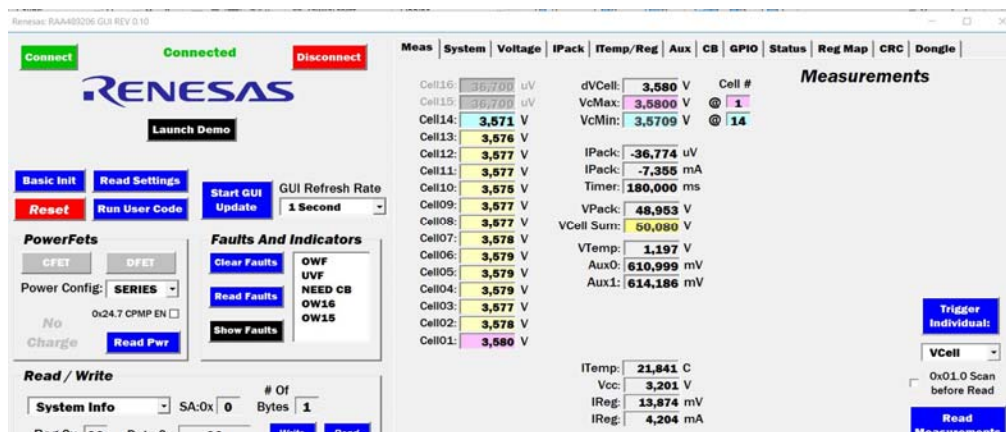
Dedykowany układ scalony typu RAA489206, którego uproszczony schemat aplikacyjny pokazano na rysunku 5 i jest szeroko opisany w poz. [10] może być stosowany w systemach BMS dla magazynów energii bazujących na 4 do 16 ogniwach litowo-jonowych. Charakteryzuje się on dużą prostotą aplikacyjną. W projekcie zastosowano zmodyfikowany przez autorów dla potrzeb projektu zestaw ewaluacyjny RTKA489206DK0000BU [11], bazujący na tym układzie, pozwalający na pasywne wyrównywanie (prąd do 500 mA) i monitorowanie napięć nawet na 16 ogniwach,

zabezpieczenie magazynu przed zwarciami, przeładowaniem oraz nadmiernym rozładowaniem. Umożliwia również pomiar temperatury w dwóch wybranych punktach oraz monitorowanie systemu z wykorzystaniem komputera PC za pośrednictwem łącza typu USB. Praktyczną realizację modelu magazynu energii „48 V” z zastosowaniem zestawu w roli systemu BMS pokazano na rysunku 6.



Rys. 6. Praktyczna realizacja modelu magazynu energii „48 V”

W ramach zestawu udostępnione jest oprogramowanie pozwalające na zarządzanie pracą systemu, wizualizację wyników pomiarów na ekranie PC i archiwizację ich w formacie Excel. Dzięki temu był on również z powodzeniem zastosowany do realizacji kolejnego komputerowo wspomaganego stanowiska pomiarowego do prowadzenia badań i testów. Graficzny interfejs użytkownika przedstawiony w formie zrzutu z ekranu pokazano na rysunku 7. Więcej informacji na ten temat dostępne jest w poz. [11]

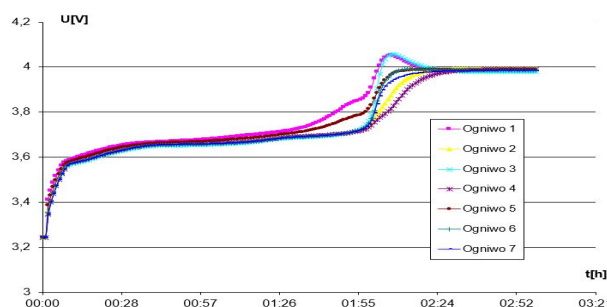


Rys. 7. Graficzny interfejs użytkownika do zarządzania pracą systemu oraz wizualizacji wyników pomiarów

Pomiary i badania własne

W ramach pomiarów i badań własnych dla każdego z modeli przeprowadzono pomiary napięć na poszczególnych ogniwach magazynów energii dla procesów ładowania, rozładowania i stanu spoczynku. Napięcia na ogniwach mierzone były z wykorzystaniem opisanych powyżej systemów monitorowania zastosowanych w magazynach energii i dla oceny ich poprawności porównywane z pomiarami wykonanymi przy pomocy multimetru 6,5 cyfry typu Keithley model 2700. Do prowadzenia badań procesu ładowania ogniw zastosowano programowalny zasilacz DC model 3664 A, pozwalający na uzyskanie napięć ładowania w zakresie 0 – 120 V i prądów ładowania 0 – 4,2 A. Do prowadzenia badań procesu rozładowania ogniw zastosowano obciążenie elektroniczne BK PRECISION model 8510 o mocy maksymalnej 600 W, napięciu maksymalnym 120 V oraz prądzie maksymalnym 120 A.

Przykładowe krzywe ładowania prądem 8 A siedmiu ogniw pierwszego magazynu energii pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Przykładowe krzywe ładowania prądem 8 A siedmiu ogniw modelu pierwszego magazynu energii

Przykładowe wyniki pomiarów napięć w procesie ładowania magazynu drugiego i trzeciego uwidocznione są na zrzutach z ekranu pokazanych na rysunkach 4 i 7.

Wnioski końcowe

Na chwilę obecną dużym wyzwaniem w projekcie było pozyskanie ogniw pochodzących z baterii trakcyjnych samochodów elektrycznych. Z zaprezentowanych powyżej magazynów energii na szczególną uwagę zasługuje rozwiązanie zastosowane w magazynie drugim. Zastosowany w nim system BMS jest programowalny i dostępny w wersjach dla 3,4,7,8,9,10,11,12,13,14,15 i 20 ogniw pracujących w połączeniu szeregowym [11].

Wszystkie rozwiązania pozwoliły na wykonanie dużej liczby wspomaganych komputerowo pomiarów i eksport ich do arkusza kalkulacyjnego Excel celem dalszej obróbki.

Uzyskane wyniki pomiarów pozwalają na stwierdzenie, że przyjęte rozwiązania były poprawne i stanowią podstawę do kontynuacji prowadzonych prac związanych z opracowaniem magazynów energii o różnych napięciach wyjściowych, pojemnościach oraz bazujących na ogniwach pochodzących z innych samochodów elektrycznych.

Wartości napięć na poszczególnych ogniwach różniły się nie więcej niż 10 do 20 mV. Wybrane wyniki pomiarów zostały zweryfikowane poprzez porównanie ich z pomiarami przeprowadzonymi z wykorzystaniem multimetru 6,5 cyfry typu Keithley model 2700.

Wprowadzenie sztucznego rozładowania wybranych ogniw o 5, 10 15 % wymagało dla dojścia do stanu zrównoważenia przejścia kilku cykli ładowania i rozładowania magazynu energii. Dobre efekty uzyskano w magazynach dwa i trzy stosując równoległe dołączenie aktywnego systemu wyrównywania napięć zastosowanego w pierwszym magazynie energii.

Uzyskane w ramach projektu i we wcześniejszych pracach wyniki badań będą wykorzystane w pracy doktorskiej jednego z współautorów.

Autorzy: mgr Piotr Maćków, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki, Oddział w Krakowie, ul. Zabłocie 39, 30-701 Kraków, E-mail: piotr.mackow@imif.lukasiewicz.gov.pl; dr inż. Piotr Guzdek, Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki, al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, E-mail: piotr.guzdek@imif.lukasiewicz.gov.pl; dr Jacek Biskupski, Biuro Ekspertyz Specjalistycznych sp. z o.o., Szlak 77/222,31-153

Kraków, E-mail: jacek.biskupski181@gmail.com; dr inż. Wojciech Grzesiak, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki, Oddział w Krakowie, ul. Zabłocie 39, 30-701 Kraków, E-mail: wojciech.grzesiak@imif.lukasiewicz.gov.pl.

LITERATURA

- [1] Moura, P.S., López, G.L., Moreno, J.I. et al. The role of Smart Grids to foster energy efficiency. *Energy Efficiency* 6, 621–639 (2013), doi.org/10.1007/s12053-013-9205-y
- [2] Eddahech A., Briat O., Vinassa J.-M., Determination of lithium-ion battery state-of-health based on constant-voltage charge phase, *Journal of Power Sources*, Volume 258, 15 July 2014, 218-227, doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.02.020
- [3] Lu L., Han X., Li J., Hua J., Ouyang M., A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles, *Journal of Power Sources*, Volume 226, 2013, 272-288, doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.10.060
- [4] Salkuti, S.R., Ray, P. (eds) *Next Generation Smart Grids: Modeling, Control and Optimization. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 824, 1-28 (2022), doi.org/10.1007/978-981-16-7794-6_1
- [5] Shokrzadeh, S. and Bibeau, E., Repurposing Batteries of Plug-In Electric Vehicles to Support Renewable Energy Penetration in the Electric Grid, *SAE Technical Paper 2012-01-0348*, 2012, doi.org/10.4271/2012-01-0348.
- [6] Faiza A., Jiao L., Nagesh M., Ersha F., Ali A., Maher-un-Nisa T., Feng W., Renjie C., Li L., Life Cycle Assessment of Lithium-ion Batteries: A Critical Review Volume 180, 2022, 106-164, doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106164
- [7] Samsu Koroma M., Costa D., Philippot M., Cardellini G., Sazzad Hosen M., Coosemans T., Messagie M., Life cycle assessment of battery electric vehicles: Implications of future electricity mix and different battery end-of-life management, *Science of The Total Environment*, Volume 831, 2022, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154859.
- [8] Zhang J., Lee J., A review on prognostics and health monitoring of Li-ion battery, *Journal of Power Sources*, Volume 196, Issue 15, 2011, 6007-6014, //doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.03.101
- [9] <https://onvolt.pl/produkt/modul-bms-smart-7s-24v-40a-li-ion-programowalny-z-obsługa-bluetooth-i-aplikacji/>, dostęp marzec 2022
- [10] <https://www.renesas.com/eu/en/document/dst/raa489206-datasheet>, dostęp marzec 2022
- [11] <https://www.renesas.com/us/en/products/power-power-management/battery-management/battery-front-end-ics/rtka489206dk0000bu-16-cell-battery-front-end-evaluation-kit>, dostęp marzec 2022