

Maciej KRYCZKA*, Jarosław JAJCZYK*, Leszek KASPRZYK*

ANALIZA PRACY SYSTEMU ZARZĄDZANIA PAKIETEM OGNIW LI-ION Z WYKORZYSTANIEM AUTORSKIEGO STANOWISKA LABORATORYJNEGO

Przedmiotem pracy jest przeprowadzenie analizy pracy systemu zarządzania pakietem ogniw litowo-jonowych w oparciu o autorskie stanowisko laboratoryjne. Opisano budowę i zasadę działania akumulatorów, a także scharakteryzowano budowę systemów zarządzania bateriami oraz przedstawiono ich podział według sposobu zarządzania energią. Przedstawiono opracowane stanowisko laboratoryjne, a następnie za jego pomocą dokonano analizy działania systemu zarządzającego pakietem ogniw Li-Ion pod kątem ładowania, rozładowywania i balansowania poszczególnych ogniw baterii.

SŁOWA KLUCZOWE: akumulatory, ogniwa litowo-jonowe, system zarządzania baterią, balansowanie ogniw.

1. WPROWADZENIE

W ostatnich czasach zauważyć można intensywny wzrost popularności urządzeń mobilnych wyposażonych w elektrochemiczne zasobniki energii (akumulatory). Istotnym z punktu widzenia niezawodności, trwałości i efektywności wykorzystania tych urządzeń jest zagwarantowanie odpowiednich warunków pracy akumulatorów. Warunki te zależne są między innymi od rodzaju zastosowanych ogniw.

Akumulator w urządzeniach mobilnych składa się z grupy ogniw połączonych w odpowiedni sposób (szeregowo i/lub równolegle). Pojedyncze ogniwo galwaniczne jest to układ dwóch elektrod zanurzonych w elektrolicie umożliwiającym przewodnictwo jonowe. W ogniwie dochodzi do zamiany energii chemicznej w energię elektryczną i odwrotnie. Budowa oraz zasada działania różnych typów ogniw jest zbliżona, a różnice pomiędzy poszczególnymi rozwiązaniami wynikają z wykorzystywanych materiałów. Układ pojedynczego ogniwa elektrochemicznego cechuje się relatywnie niskim napięciem (z zakresu $1,0 \div 4$ V) zależnym od użytych materiałów [1]. W celu osiągnięcia lepszych parametrów elektrycznych ogniwa łączy się szeregowo (zwiększając napięcie) lub równolegle (zwiększając pojemność) a powstały w ten sposób układ ogniw nazywany jest baterią.

* Politechnika Poznańska

Analizując przydatność zastosowania danego akumulatora bierze się pod uwagę szereg parametrów takich jak [4]:

- napięcie znamionowe U_n – wynika bezpośrednio z rodzaju, liczby oraz konfiguracji zastosowanych w nim pojedynczych ogniw galwanicznych,
- pojemność I_n – wyrażona w amperogodzinach (Ah) odnosi się bezpośrednio do ilości ładunku, jaką może on zmagazynować,
- sprawność elektryczna η_{el} – stosunek ładunku elektrycznego Q_w pobranego z akumulatora do ładunku elektrycznego Q_i potrzebnego do jego ponownego naładowania,
- sprawność energetyczna η_{en} – stosunek energii elektrycznej W_w pobranej z akumulatora do energii elektrycznej W_i potrzebnej do jego ponownego naładowania,
- stan zużycia (ang. State of Health - SoH) – jest parametrem odnoszącym aktualny stan akumulatora do jego stanu początkowego, informującym użytkownika jak długo można jeszcze korzystać z akumulatora,
- trwałość (liczba cykli pracy) – parametr określający pozostałą liczbę cykli ładowania oraz rozładowania zanim pojemność spadnie poniżej 80% wartości początkowej [3].

W wyniku wielu badań mających na celu polepszenie parametrów elektrochemicznych magazynów energii opracowano szereg rozwiązań. Wyróżnić można między innymi: akumulatory kwasowo-ołowiowe, akumulatory niklowo-kadmowe, akumulatory niklowo-metalowo-wodorkowe oraz całą grupę akumulatorów litowo-jonowych (obecnie jedne z najbardziej efektywnych rozwiązań magazynowania energii).

Jednym z głównych wyzwań związanych z użytkowaniem akumulatorów jest utrzymywanie stopnia naładowania SoC poszczególnych ogniw na zbliżonym co do wartości poziomie. Różnice w wartości SoC pomiędzy ogniwami wynikać mogą z nieidealności wykonania pojedynczych elementów składowych, a także z pojawiających się zjawisk samorozładowania [2].

W przypadku baterii, w której SoC jednego z ogniw znacząco odbiega od pozostałych pojemność całkowita pakietu ograniczona jest ogniwem o najniższym stopniu naładowania. Ograniczenie to wynika z faktu, że ogniwo to rozładowuje się jako pierwsze, a dalszy proces rozładowywania mógłby doprowadzić do jego uszkodzenia [6]. W związku z przedwczesnym rozładowaniem się jednego z ogniw w pozostałych zostaje niewykorzystana część energii, która z biegiem czasu może rosnąć wraz ze wzrostem różnicy SoC pomiędzy ogniwami co w rezultacie doprowadzi do przedwczesnego zużycia całego pakietu lub jego awarii. Aby uniknąć uszkodzeń i nadmiernego zużycia stosuje się systemy zarządzania bateriami BMS (ang. Battery Management System) mające na celu balansowanie, czyli utrzymywanie napięcia poszczególnych ogniw na jednokowym poziomie.

2. SYSTEMY ZARZĄDZANIA BATERIAMI

Stosowanie systemów zarządzania bateriami wynika z konieczności utrzymania parametrów łańcucha ogniw na poziomie pozwalającym najefektywniej korzystać z ich możliwości z uwzględnieniem aktualnej kondycji. Ponadto systemy BMS pozwalają na zbieranie oraz gromadzenie parametrów pakietu ogniw takich jak np. napięcie na poszczególnych ogniwach, sumaryczne napięcie całego pakietu, prąd ładowania i rozładowania, a także parametrów nieelektrycznych np. temperatury. Systemy BMS poza zarządzaniem baterią często pełnią również rolę zabezpieczeń przeciwprzepięciowych oraz nadprądowych [5]. Do głównych zadań systemów BMS zalicza się:

- zabezpieczenie baterii przed uszkodzeniem,
- wydłużenie żywotności baterii (np. poprzez zarządzanie temperaturą pracy),
- balansowanie stanu naładowania poszczególnych ogniw,
- zabezpieczenie przed nadmiernym ładowaniem i rozładowywaniem.

Systemy BMS ze względu na strukturę dzielą się na scentralizowane oraz rozproszone, co praktyce przekłada się na sposób oraz miejsce montażu poszczególnych jego elementów.

W systemach scentralizowanych wyróżniamy jedną zintegrowaną jednostkę sterującą, która zarządza pracą całego systemu. W jednostce tej zawiera się część systemu odpowiedzialna za zbieranie danych z ogniw w sposób bezpośredni (ogniwa są do niej podłączone), część odpowiedzialna za podejmowanie decyzji na podstawie zaimplementowanych algorytmów sterujących oraz część wykonawcza mająca na celu sterowanie urządzeniami zewnętrznymi np. styczniki lub chłodzenie [6].

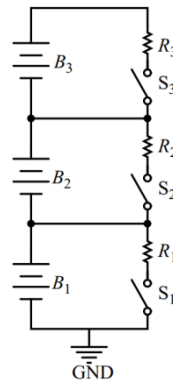
Systemy rozproszone w przeciwieństwie do systemów scentralizowanych charakteryzują się tym, że ogniwa podłączone są do jednostki sterującej pośrednio poprzez dodatkowe moduły komunikujące się z nią np. za pomocą magistrali CAN, Ethernet itp.

Systemy rozproszone pozwalają na ograniczenie liczby przewodów w bardziej rozbudowanych systemach [6].

Systemy BMS poza podziałem z uwagi na ich strukturę dzieli się również na dwie podgrupy z uwagi na sposób balansowania ogniw. Wyróżniamy:

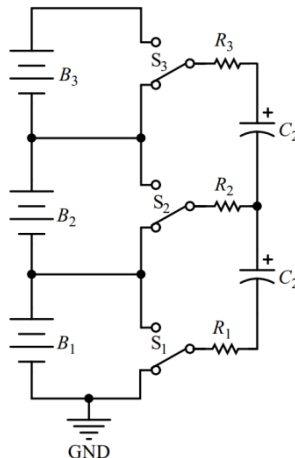
- balansowanie pasywne – nadmiar energii jest wytracany na rezystorach,
- balansowanie aktywne – nadmiar energii jest przeładowywany do pozostałych ogniw.

Balansowanie pasywne realizowane jest z wykorzystaniem rezystorów bocznikujących (rys. 1). Polega ono na wytracaniu nadmiaru energii za pomocą załączania rezystorów bocznikujących ogniwa. W przypadku wystąpienia niezbalansowania rezystory bocznikujące załączane są za pomocą tranzystorów na ogniwach o wyższym SoC w celu wytracenia części energii [7].



Rys. 1. Schemat układu z rezystorami bocznikującymi [5]

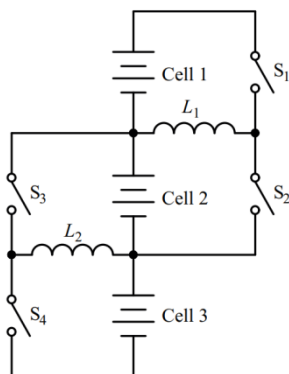
Balansowanie aktywne może być realizowane z wykorzystaniem kondensatorów bocznikujących (rys. 2). Metoda ta jest najprostszą metodą aktywną polegającą na przeładowywaniu nadmiaru energii pomiędzy ogniwami za pomocą odpowiedniego przełączania boczników pojemnościowych. Struktura układu balansującego jest bardzo prosta jednak czas balansowania w porównaniu z pozostałymi metodami aktywnymi jest bardzo długi. W przypadku wystąpienia niezbalansowania kondensatory załączane są za pomocą tranzystorów lub styczników na ogniwach o wyższym SoC w celu naładowania nadwyżką energii a następnie przełącza się je na ogniwo o niższym SoC, gdzie zostają rozładowane [8].



Rys. 2. Schemat układu z kondensatorami bocznikującymi [5]

Balansowanie aktywne może być zrealizowane również z wykorzystaniem dodatkowych indukcyjności (rys. 3). Metoda indukcyjna w balansowaniu wykorzystuje indukcyjność oraz pierwsze prawo komutacji. Ogniwa połączone są

wzajemnie za pomocą tranzystorów lub styczników, a we wspólnych gałęziach pomiędzy poszczególnymi ogniwami zainstalowana jest cewka magazynująca energię w polu magnetycznym. Na skutek odpowiedniego sterowania załączaniem i rozłączaniem gałęzi cewka gromadzi nadwyżkę energii z jednego ogniwa po czym oddaje ją do ogniwa o niższym SoC. Balansowanie indukcyjne jest znacznie szybsze od balansowania pojemnością jednak charakteryzuje się dużymi stratami [8].



Rys. 3. Schemat układu z kondensatorami bocznikującymi [5]

3. STANOWISKO BADAWCZE SYSTEMU BMS

W ramach pracy zbudowano stanowisko w oparciu o system zarządzania bateriami EMUS G1 BMS - CENTRALIZED CCGM (CAN Cell Group Module). System ten zawiera centralną jednostkę sterującą EMUS G1 Control Unit, skomunikowaną za pomocą magistrali CAN z modułami EMUS G1 Centralized CAN Cell Group Module (CCGM). System umożliwia obsługę do 32 modułów baterii składających się z maksymalnie 16 ogniw każdy. W projekcie wykorzystano dwa moduły CCGM, co umożliwia obsługę dwóch modułów baterii o maksymalnej sumarycznej liczbie 32 ogniw. Dodatkowo, moduły umożliwiają pomiar temperatury baterii poprzez 5 dodatkowych termistorów NTC. O wyborze prezentowanego systemu zdecydowały jego możliwości techniczne pozwalające na komunikację z wykorzystaniem magistrali CAN, komunikację Bluetooth, możliwość wyposażenia w wyświetlacz, a także możliwość programowania predefiniowanych funkcji umożliwiających obsługę dodatkowych urządzeń. Stanowisko badawcze wyposażone zostało w następujące urządzenia:

- jednostka sterująca EMUS G1 Control Unit CU021A – urządzenie wyposażone jest w sześć masowych wyjść programowalnych o napięciu maksymalnym do 32 V oraz prądzie maksymalnym 0,5 A, a także pięć wejść programowalnych o napięciu z zakresu 5 ÷ 32 V umożliwiających obsługę dodat-

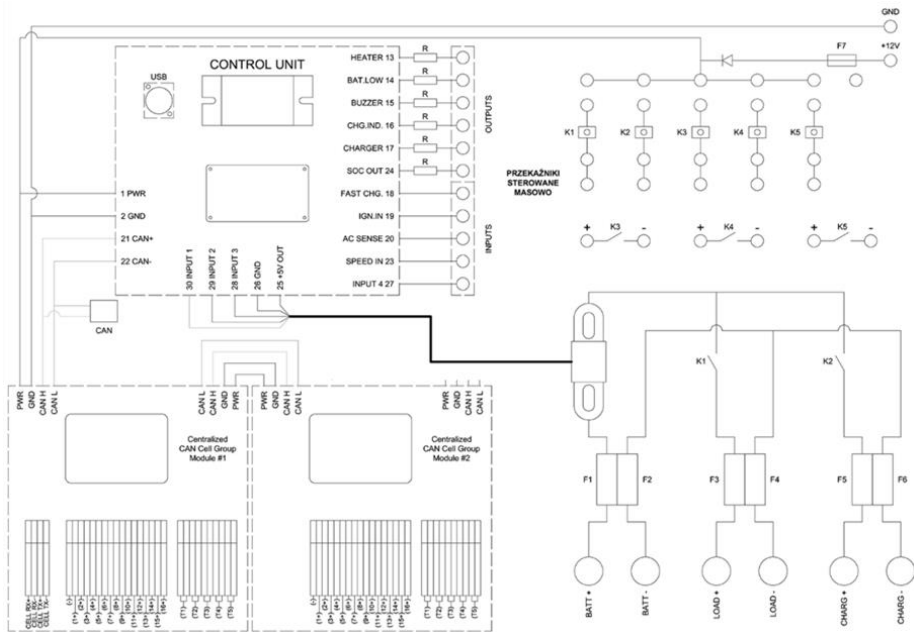
kowych urządzeń. Dodatkowo, moduł wyposażony jest w możliwość komunikacji za pomocą magistrali CAN oraz magistrali szeregowej [9],

- moduł ogniw CAN CCGM022D – połączone są z jednostką sterującą oraz pomiędzy sobą za pomocą magistrali CAN. Pozwalają na podłączenie do 16 pojedynczych ogniw oraz umożliwiają pomiar temperatury za pomocą dodatkowych termistorów NTC 10 k Ω [10],
- czujnik prądu CS013A – umożliwia dwukierunkowy pomiar prądu ładowania oraz rozładowywania baterii o maksymalnym natężeniu 350 A [11],
- wyświetlacz DU011A – umożliwia monitorowania parametrów w systemie bez konieczności komunikacji jednostki sterującej z komputerem [12].

W celu wykorzystania wszystkich funkcjonalności wybranego systemu wyposażono go w dodatkowe urządzenia takie jak:

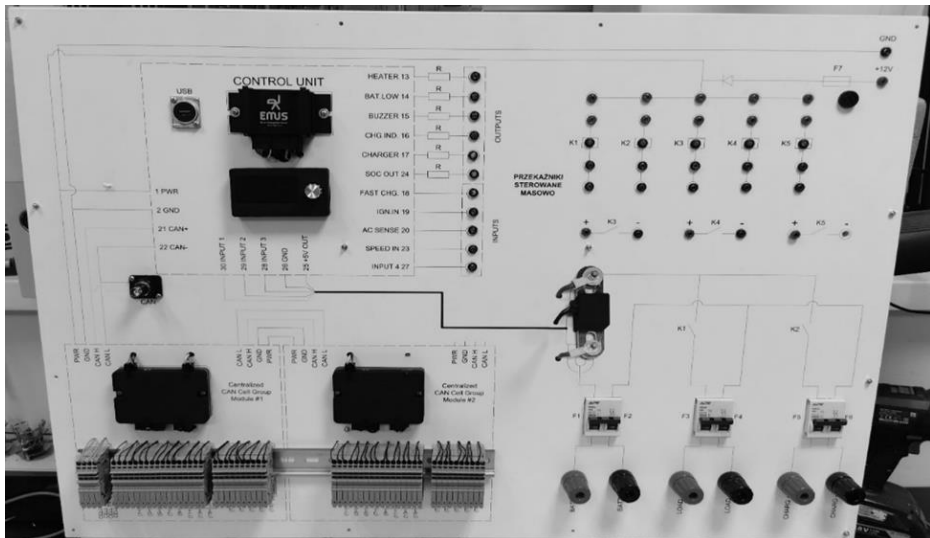
- stycznik wysokoprądowy – zdecydowano się na zainstalowanie na stanowisku dwóch styczników mechanicznych Albright Schütz SU60B-2421 o maksymalnym napięciu obwodu roboczego równym 120 V, maksymalnym prądzie obwodu roboczego 100 A oraz napięciu sterującym 12 V [13]. Styczniki w obwodzie roboczym układu umożliwiają załączanie i rozłączanie baterii, ładowarki i obciążenia.
- przekaźniki dodatkowe – ze względu na niski maksymalny prąd wyjściowy jednostki sterującej (0,5 A) zdecydowano się na zastosowanie przekaźników półprzewodnikowych SSR ANLY ELECTRONICS ASR-25DD o maksymalnym napięciu obwodu roboczego równym 120 V, maksymalnym prądzie obwodu roboczego 25 A oraz napięciu sterującym $3 \div 32$ V [14],
- wyłączniki nadprądowe – w celu zabezpieczenia układu przed przeciążeniami zdecydowano się zastosować wyłącznik nadprądowy APV-WNDC-2P-63A o prądzie znamionowym 63 A [15],
- listwa zaciskowa – w celu umożliwienia szybkiego łączenia poszczególnych ogniw baterii i jednostek CCGM, a także podłączania dodatkowych termistorów zastosowano listwę zaciskową składającą się dwudziestu siedmiu modułów WAGO 2102-1201 o prądzie znamionowym 24 A oraz napięciu znamionowym 800 V dla każdej jednostki [16].
- wysokoprądowe złącza laboratoryjne – w obwodzie wysokoprądowym do podłączenia baterii, obciążenia oraz ładowarki zastosowano wysokoprądowe złącza laboratoryjne SCHÜTZINGER POL 8760 L o prądzie znamionowym 100 A oraz napięciu znamionowym 1 kV [17].

Schematyczną budowę opracowano stanowisko laboratoryjnego przedstawiono został na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat stanowiska laboratoryjnego

Rysunek 5 przedstawia zbudowane stanowisko laboratoryjne do badania ogniw Li-Ion oraz systemu BMS.



Rys. 5. Stanowisko laboratoryjne do badania ogniw Li-Ion

4. ANALIZA PRACY SYSTEMU ZARZĄDZANIA PAKIETEM OGNIW LI-ION

W celu przeprowadzenia analizy pracy systemu zarządzania pakietem ogniw Li-Ion, stanowisko laboratoryjne wyposażone zostało w baterię składającą się z trzynastu szeregowo połączonych ogniw litowo-jonowych typu NMC o pojemności 4000 mAh. Następnie przeprowadzono pomiary parametrów systemu w procesie balansowania ogniw, a także ładowania i rozładowywania całej baterii. W realizacji procesu rozładowywania ogniw wykorzystano obciążenie programowalne KIKUSUI PLZ205W umożliwiające dodatkowe monitorowanie parametrów takich jak prąd pobierany z baterii oraz napięcie. W procesie ładowania wykorzystano zasilacz laboratoryjny OWON ODP6033. Wartości napięć na poszczególnych ogniwach oraz prądy balansujące zarejestrowane zostały przez jednostkę sterującą BMS.

4.1. Badanie układu balansującego

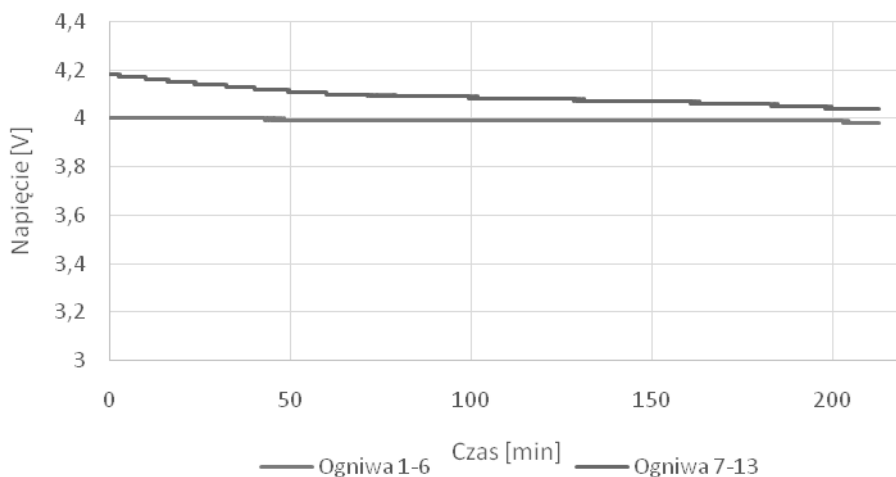
W celu zbadania działania układu balansującego, sześć z trzynastu ogniw baterii znajdującej się na stanowisku zostało częściowo rozładowane z wykorzystaniem obciążenia programowalnego KIKUSUI PLZ205W. Poziomy napięć na poszczególnych ogniwach baterii przed rozpoczęciem procesu balansowania przedstawiono w tabeli 1.

Tabela. 1. Poziomy napięć poszczególnych ogniw baterii przed procesem balansowania.

Nr ogniwa [-]	1	2	3	4	5	6	
Napięcie [V]	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	
Nr ogniwa [-]	7	8	9	10	11	12	13
Napięcie [V]	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,17	4,18

Dla tak skonfigurowanego układu pomiarowego uruchomiono proces balansowania, którego przebieg został przedstawiony na rysunkach 6 i 7.

Analizując przebiegi napięć zestawione na rysunku 6, zaobserwowano, że układ balansujący obniżył napięcie na ogniwach o numerach od 7 do 13 z wartości około 4,18 V do wartości 4,03 V, w związku z czym maksymalna różnica napięć pomiędzy ogniwami zmalała z wartości 0,18 V do 0,05 V. Poziomy napięć po zakończonym procesie balansowania przedstawiono w tabeli 2. Przebiegi prądów balansujących dla poszczególnych ogniw są zbliżone, w związku z czym postanowiono omówić je na podstawie przebiegu prądu balansującego ogniwa o numerze 7.

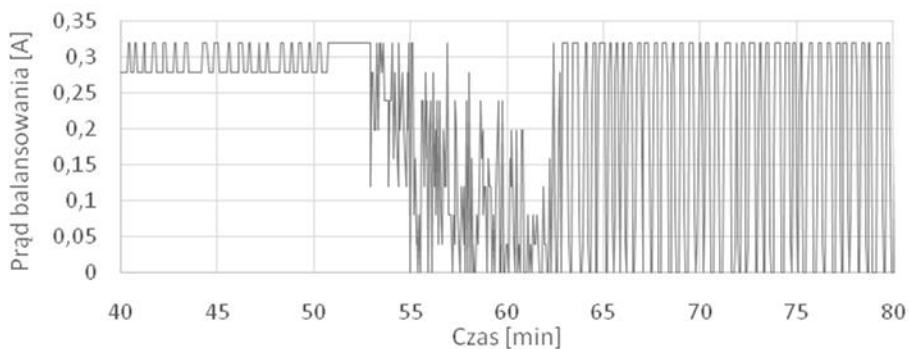


Rys. 6. Przebieg napięcia na ogniwach podczas procesu balansowania

Tabela. 2. Poziomy napięć poszczególnych ogniw po zakończeniu procesu balansowania.

Nr ogniwa [-]	1	2	3	4	5	6	
Napięcie [V]	3,98	3,98	3,98	3,98	3,98	3,98	
Nr ogniwa [-]	7	8	9	10	11	12	13
Napięcie [V]	4,03	4,03	4,03	4,03	4,03	4,03	4,03

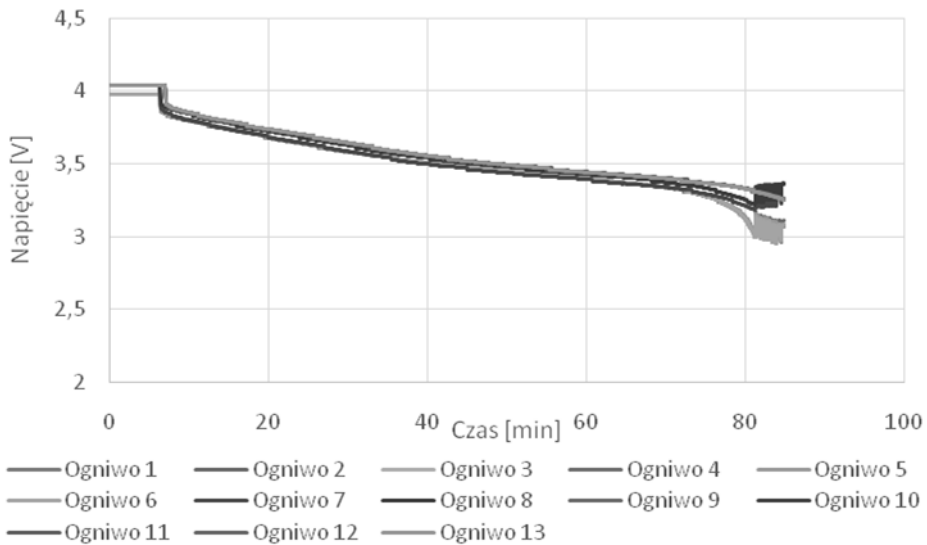
Z przebiegu przedstawionego na rysunku 7 wynika, że do wartości napięcia około 4,10 V na ogniwo, prąd balansujący oscyluje pomiędzy 0,28 A i 0,32 A. Po osiągnięciu wartości napięcia 4,09 V na ogniwo prąd zaczyna oscylować pomiędzy wartością 0 A oraz 0,32 A.



Rys. 7. Przebieg prądu balansującego ogniwa o numerze 7

4.2. Badanie procesu rozładowywania baterii

W procesie rozładowywania wykorzystano zbalansowaną baterię z poprzedniego punktu. Poziomy napięć na poszczególnych ogniwach przed rozpoczęciem procesu rozładowywania zapisano w tabeli 2. Rozładowanie baterii realizowano za pomocą obciążenia programowalnego KIKUSUI PLZ205W stałą wartością prądu 3 A do ustawionej wartości napięcia 2,7 V na ogniwo. Zgodnie z konfiguracją systemu BMS, powinien on rozłączyć obciążenie uniemożliwiając dalsze rozładowywanie w chwili osiągnięcia przez którekolwiek ogniwo napięcia 2,9 V. Przebiegi procesu rozładowywania poszczególnych ogniw przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Przebiegi napięć na ogniwach baterii podczas procesu rozładowywania

Analizując uzyskane przebiegi można zaobserwować, że podczas procesu rozładowywania ogniwa nie są balansowane o czym świadczy różnica w poziomach napięć na końcu procesu. Po przekroczeniu przez jedno z ogniw napięcia 2,9 V, system BMS uniemożliwił dalsze rozładowywanie baterii poprzez odłączenie jej od szyny zasilającej.

4.3. Badanie procesu ładowania baterii

Do przeprowadzenia badania procesu ładowania wykorzystano rozładowaną w poprzednim punkcie baterię. Poziomy napięć na poszczególnych ogniwach przed rozpoczęciem procesu ładowania przedstawiono w tabeli 3. Do naładowania baterii wykorzystano zasilacz laboratoryjny OWON ODP6033 o nastawio-

nym napięciu wyjściowym 53,3 V (4,1 V na ogniwo) oraz ograniczeniu prądowym równym 3 A.

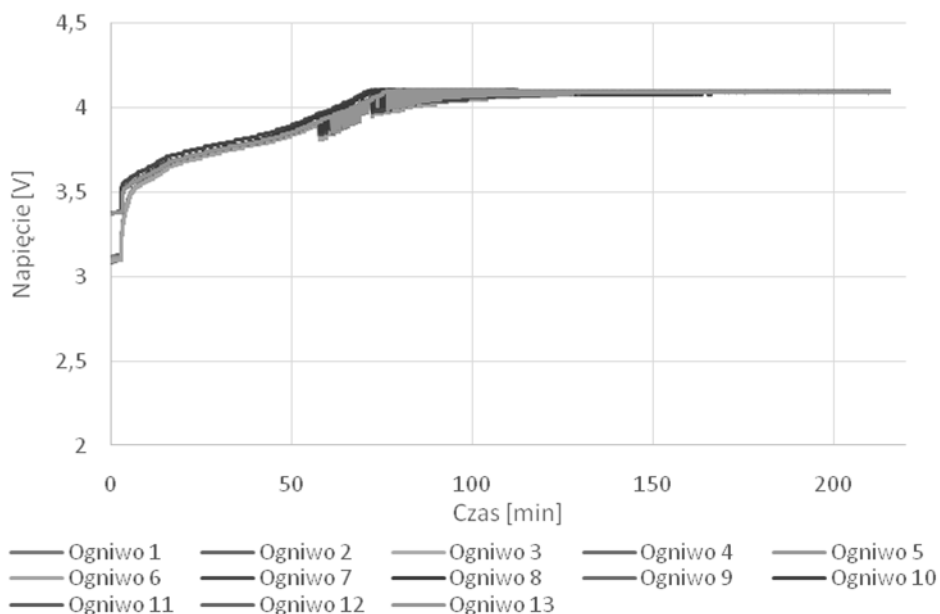
Tabela. 3. Poziomy napięć poszczególnych ogniw baterii.

Nr ogniwa [-]	1	2	3	4	5	6	
Napięcie [V]	3,10	3,12	3,10	3,09	3,11	3,10	
Nr ogniwa [-]	7	8	9	10	11	12	13
Napięcie [V]	3,38	3,38	3,38	3,38	3,38	3,38	3,38

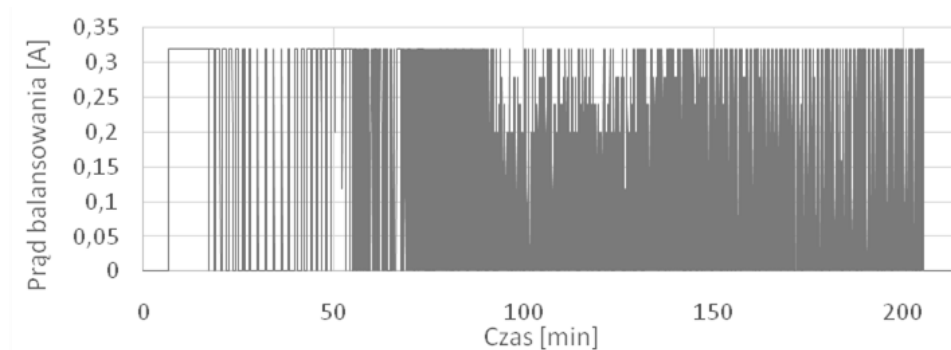
Dla tak skonfigurowanego stanowiska laboratoryjnego oraz zasilacza uruchomiono proces ładowania, podczas którego rejestrowano przebiegi napięć na poszczególnych ogniwach baterii oraz prądy balansujące. Wyniki zarejestrowanych pomiarów przedstawiono na rysunkach 9 oraz 10.

Analizując zarejestrowane przebiegi napięć (rys. 9) można zaobserwować, że podczas procesu ładowania baterii zachodzi proces balansowania napięć na poszczególnych ogniwach o czym świadczy ustabilizowanie się napięcia w końcowej fazie ładowania na jednakowym poziomie.

Przebiegi prądów balansujących dla poszczególnych ogniw są zbliżone, w związku z czym postanowiono przedstawić oraz omówić je na podstawie przebiegu prądu balansującego ogniwa o numerze 7 (rys. 10).



Rys. 9. Przebieg napięć na ogniwach baterii podczas procesu ładowania



Rys. 10. Przebieg prądu balansującego ogniwa numer 7 podczas procesu ładowania

Można zauważyć, że wraz ze zbliżaniem się napięcia na poszczególnych ogniwach do wartości 4 V (około 60-70 minuty), częstotliwość załączania prądów balansujących wzrosła. Zjawisko to spowodowane jest koniecznością obniżenia napięcia na ogniwach o większym stopniu naładowania celem wyrównania napięć w końcowej fazie procesu ładowania. Poziomy napięć na poszczególnych ogniwach po zakończonym procesie ładowania przedstawiono w tabeli 4.

Tabela. 4. Poziomy napięć poszczególnych ogniw baterii po zakończeniu procesu ładowania.

Nr ogniwa [-]	1	2	3	4	5	6	
Napięcie [V]	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	
Nr ogniwa [-]	7	8	9	10	11	12	13
Napięcie [V]	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10

Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, że w procesie ładowania baterii z wykorzystaniem systemu BMS napięcia na poszczególnych ogniwach zostały zbalansowane oraz ustaliły się na zadeklarowanej w programie wartości 4,1 V na ogniwo po czym proces ładowania został zakończony (zasilacz został odłączony od szyny zasilającej poprzez rozłączenie styków przekaźnika) w związku z czym stwierdzono, że ochrona baterii przed przeładowaniem działa poprawnie.

5. PODSUMOWANIE

Przedstawiona w pracy stanowisko umożliwiło przeprowadzenie badań laboratoryjnych systemu zarządzania pracą baterii składającej się z trzynastu ogniw litowo-jonowych

Analizując pracę systemu pod kątem balansowania poziomu naładowania ogniw zaobserwowano, że napięcie na ogniwach o niższym poziomie naładowania zmienia się nieznacznie podczas cyklu balansowania (nie są one doładowywane), a nadmiar energii z pozostałych ogniw zostaje wytracony na rezystancji (balansowanie pasywne). Układ balansujący rozładował nadmiar energii w ogniwach o wyższym stopniu naładowania w celu obniżenia poziomu napięcia tych ogniw do poziomu odpowiadającemu napięciu ogniw o niższym stopniu naładowania. Wartość prądu balansującego ogniwa zmienia się wraz z malejącą różnicą napięć pomiędzy ogniwami (średnia wartość prądu balansującego maleje wraz ze spadkiem różnicy napięć).

Zaobserwowano, że zabezpieczenia układu przed nadmiernych rozładowaniem oraz przeładowaniem działają prawidłowo. W obydwu przypadkach układ zasilacza i obciążenia zostały odłączone od baterii po przekroczeniu zadeklarowanych w programie bezpiecznych parametrów.

Stwierdzono, że w trakcie ładowania baterii, ogniwa są na bieżąco balansowane w związku z czym nie wymagają powtarzania procesu balansowania po zakończonym ładowaniu.

Analizując przebiegi napięć na poszczególnych ogniwach baterii w procesie ładowania można stwierdzić, że ogniwa zostały naładowane do napięcia około 4,05 V w czasie 75 minut, a pozostała część cyklu ładowania (około 140 minut) została wykorzystana na doładowanie ogniw o 0,05 V. W związku z powyższym z pozoru wydawałoby się, że ładowanie mogło zostać zakończone wcześniej, ponieważ czas oczekiwania na doładowanie baterii jest nieadekwatny do ilości energii jaka w tym czasie zostaje zmagazynowana w ogniwie, jednak regularne wyrównywanie stanu naładowania ogniw jest niezbędne. Co więcej proces ten jest najbardziej efektywny w końcowej fazie ładowania, ze względu na to, że dopiero wtedy niewielka różnica stanu naładowania powoduje dysproporcje napięć.

LITERATURA

- [1] Besenhard J. O., „Handbook of Battery Materials”, Institut für Chemische Technologie Anorganischer Stoffe, Technische Universität Graz 1999.
- [2] Bagotsky V. S., Skundin A. M., Volkovich Y. M., „Electrochemical Power Sources”, New Jersey 2015.
- [3] Garche J., Karden E., Moseley P., Rand D., „Lead-Acid Batteries for Future Automobiles”, Elsevier 2017.

- [4] Jankowski K., „Sprawność energetyczna akumulatora samochodowego w warunkach rozładowywania rozruchowego”, Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Wydział Mechaniczny, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn.
- [59] Smets A., Jäger K., Isabella O., van Swaaij R., Zeman M., „Solar Energy”, UIT Cambridge, England.
- [6] Warner J., „The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design”, XALT Energy, Midland, USA, 2015.
- [7] Branco Marques J. M., „Battery Management System (BMS) for Lithium-Ion Batteries”, Faculty of Sciences and Technology, University of Coimbra, 2014.
- [8] Cao J., Schofield N., Emadi A., „Battery Balancing Methods: A Comprehensive Review”, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), September, 2008, China.
- [9] Dokumentacja techniczna EMUS G1 Control Unit, dostępne na <https://emusbms.com/wp-content/uploads/2021/04/EMUS-CU021A-Datasheet.pdf>, [dostęp: 18.05.2022].
- [10] Dokumentacja techniczna EMUS Centralized CAN Cell Group Module, dostępne na <https://emusbms.com/wp-content/uploads/2021/04/EMUS-CCGM022D-Datasheet-1.pdf>, [dostęp: 18.05.2022].
- [11] Dokumentacja techniczna czujnika prądu EMUS CS013A, dostępne na <https://emusbms.com/wp-content/uploads/2021/04/EMUS-CS013A-Datasheet.pdf>, [dostęp: 18.05.2022].
- [12] Dokumentacja techniczna wyświetlacza EMUS G1 Display Unit, dostępne na <https://emusbms.com/wp-content/uploads/2021/01/EMUS-Display-Unit-User-Manual-1.2.0.pdf>, [dostęp: 18.05.2022].
- [13] Dokumentacja techniczna stycznika Albright Schütz SU60B-2421, dostępne na <https://www.elektromobilitaet-riester.de/app/download/17305666625/SU60.pdf?t=1629955703>, [dostęp: 24.05.2022].
- [14] Dokumentacja techniczna przekaźnika ANLY ELECTRONICS ASR-25DD, dostępne na https://www.tme.eu/Document/2a31510f65131a082404cbea8d19f04d/ASR_1f.pdf, [dostęp: 24.05.2022].
- [15] Dokumentacja techniczna wyłącznika APV-WNDC-2P-63A, dostępne na <https://electro24.pl/pl/p/Wylacznik-nadpradowy-fotowoltaiczny-2P-DC-63A-500V/8163>, [dostęp: 24.05.2022].
- [16] Dokumentacja techniczna modułu WAGO 2102-1201, dostępne na <https://www.wago.com/pl/złączki-listwowe/2-przewodowa-złączka-przelotowa/p/2102-1201>, [dostęp: 24.05.2022].
- [17] Dokumentacja techniczna złącza SCHÜTZINGER POL 8760 L, dostępne na <https://www.tme.eu/Document/91b6e0ede36404f31faad0522fc3f5b2/POL8760.pdf>, [dostęp: 24.05.2022].

**ANALYSIS OF THE OPERATION OF THE LI-ION CELL PACKAGE
MANAGEMENT SYSTEM WITH THE USE OF A PROPRIETARY
LABORATORY STAND**

The subject of the work is to analyze the operation of the lithium-ion cell package management system based on a proprietary laboratory stand. The structure and principle of operation of batteries are described, as well as the structure of battery management systems and their division according to the method of energy management. The developed laboratory stand was presented, and then the operation of the system managing the Li-Ion cell package in terms of charging, discharging and balancing of individual cells of the battery was analyzed.

KEYWORDS: batteries, lithium-ion cells, battery management system, cell balancing.

(Received: 17.10.2022, revised: 05.11.2022)