

Koncepcja systemu nadzorującego i zarządzającego baterią ogniw (BMS) z aktywnym układem ich balansowania

mgr inż. Wojciech Kurpiel
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Concept of the battery management system (BMS) with active balancing system

Streszczenie:

W artykule przedstawiono aktywne metody balansowania ogniw, spośród których wybrano metodę zastosowaną w systemie nadzorującym i zarządzającym baterią ogniw (BMS). Potrzeba opracowania systemu nadzorującego i zarządzającego baterią wynika z zastosowania ogniw nowej generacji, litowych, bardzo wrażliwych na przeładowanie. Umożliwia on zabezpieczenie baterii ogniw zarówno przed skutkami nierównomiernego doładowywania, jak również przed przeładowaniem. W artykule wyjaśniono cel balansowania, opisano metodę balancowania ogniw do ogniw zastosowaną w systemie BMS aktualnie wdrażanym w ciągniku podwieszanym PCA-1 oraz przedstawiono nowe rozwiązanie systemu BMS.

Słowa kluczowe: górnictwo, balansowanie ogniw, napęd akumulatorowy, elektronika, akumulator, koleje podziemne

Keywords: mining industry, cell balancing, battery drive, electronics, battery, underground railways

Abstract:

Active methods for balancing the cells, from which the method using the BMS has been selected, are presented. Necessity of development of battery management system results from using new generation lithium cells, which are very sensitive to overcharging. The system protects the cells against both uneven charging and overcharging. Reason for balancing the cells is explained, pack to cell method, which is now under implementation in BMS system of PCA-1 suspended locomotive is described. New solution of BMS is also presented.

1. Wprowadzenie

W polskich kopalniach pracuje coraz więcej maszyn i urządzeń zasilanych z baterii akumulatorów. Stosowane dotąd w górnictwie ogniwa wtórne to: kwasowo-ołowiowe, niklowo-kadmowe i niklowo-wodorkowo-metalowe. Każde z nich stwarza zagrożenia. Przykładowo ogniwa kwasowo-ołowiowe w trakcie ładowania wydzielają wodór, który jest gazem wybuchowym, a obecność kwasu siarkowego stwarza potencjalne zagrożenie dla obsługi i może doprowadzić do oparzeń. Z tych powodów coraz więcej producentów stosuje ogniwa z grupy litowych, które są jednak bardzo wrażliwe na głębokie rozładowanie, przeładowanie oraz przegrzanie.

Stąd bardzo ważna jest diagnostyka ogniw akumulatorów, by mogły funkcjonować one jako niezawodne i stabilne źródła energii elektrycznej w jak najdłuższym czasie, charakteryzując się przy tym dużą sprawnością energetyczną oraz wysokim poziomem bezpieczeństwa [3]. Diagnostykę ogniw litowych realizuje się stosując specjalizowane układy elektroniczne określane skrótem BMS (Battery Management System).

Zastosowanie systemu BMS ma na celu zapobieżenie uszkodzeniu akumulatora w przypadku jego przeładowania, głębokiego rozładowania albo przegrzania [1]. System BMS może również pełnić funkcję miernika poziomu naładowania baterii, sprawdzać zgodność jej charakterystyki z wymaganiami odbiornika i optymalizować przebieg procesu ładowania ogniw w aspekcie zwiększenia ich wydajności.

2. Metody balansowania ogniw

Balansowanie ogniw w akumulatorze ma na celu zrównanie poziomu naładowania wszystkich ogniw. Realizuje się to za pośrednictwem systemu BMS. Jest to konieczne, ponieważ ogniwa, dostarczane przez tego samego producenta, mogą różnić się między sobą poziomem maksymalnego rozładowania, pojemności i rezystancji wewnętrznej. Różnice te mogą się pogłębiać w trakcie eksploatacji. Niekorzystnym czynnikiem może być praca poszczególnych ogniw w różnych temperaturach. W końcowym efekcie skutkuje to różnym poziomem ich naładowania, co z kolei wpływa na wartość całkowitej pojemności baterii (część ogniw w niezrównoważonej baterii może się rozładowywać lub ładować szybciej niż pozostałe). Równoważenie jest zalecane już w przypadku baterii składającej się z co najmniej trzech ogniw, zaś w przypadkach większej liczby, staje się koniecznością.

Metody balansowania ogniw można podzielić na trzy główne grupy [2]:

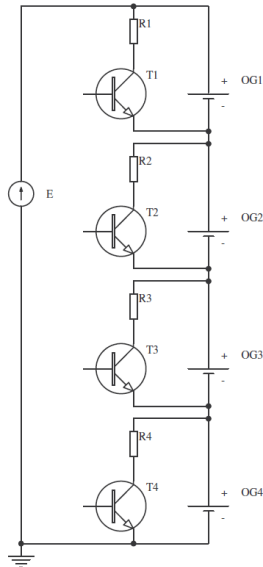
- balansowanie ogniw metodą doboru ogniw (Battery selection),
- pasywne balansowanie ogniw (Passive methods),
- aktywne balansowanie ogniw (Active methods).

2.1. Balansowanie ogniw metodą doboru ogniw

Bateria składana jest z wyselekcjonowanych ogniw. Są one dobierane pod względem właściwości elektrochemicznych (powinny być jednakowe). Taki sposób doboru ogniw nie wymaga balansowania ogniw, ponieważ różnice napięcia i prądu elektrycznego są niewielkie. Ta metoda nie jest wystarczająca do utrzymania baterii ogniw połączonych szeregowo w równowadze przez cały czas eksploatacji. Po dłuższym czasie eksploatacji mogą wystąpić znaczące różnice związane z ich samowyładowaniem oraz różnym poziomem naładowania związanym ze starzeniem się samych ogniw. Ta metoda może być używana wyłącznie dla wyselekcjonowanych ogniw.

2.2. Pasywne balansowanie ogniw

Balansowanie pasywne polega na rozpraszaniu nadmiarowej energii na ciepło za pomocą rezystorów. W tym przypadku wartości napięć poszczególnych ogniw są monitorowane w mikrokontrolerze za pośrednictwem przetwornika analogowo-cyfrowego, na którego wejście, poprzez multiplekser, załączane są poszczególne ogniwa. Po wykryciu różnicy na poszczególnych ogniwach, mikrokontroler decyduje, który klucz tranzystorowy ma być wysterowany i załączyć bocznik rezystorowy. Skutkuje to rozładowaniem ogniwa przez element obwodu równoważenia pasywnego – rezystor, połączony równolegle z każdym ogniwem i trwa do momentu, gdy napięcie ogniwa przeładowanego zrówna się z wartością napięcia pozostałych ogniw. Wówczas ładowanie pakietu jest kontynuowane [5]. Równocześnie, kontrolowane są stale wartości napięć wszystkich pozostałych ogniw. Ideę pasywnego równoważenia ogniw przedstawia rysunek 1.

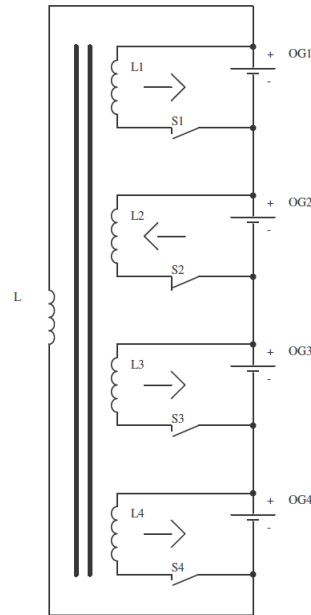


Rys. 1. Obwód pasywnego balansowania ogniw [3]

Pasywne balansowanie ogniw ma jednak wady. Jedną z nich jest niska sprawność, wynikająca z faktu, że nadwyżka energii zgromadzona w niezrównoważonych ogniwach tracona jest w rezystorze na ciepło. Oprócz tego całkowita pojemność zestawu baterii jest ograniczona potrzebą dostosowania poziomu naładowania poszczególnych ogniw do pojemności "najsłabszego" z nich. Balansowanie pasywne można przeprowadzać zatem wyłącznie w czasie trwania procesu ładowania ogniw. Nie można jednak w ten sposób zapobiec niezrównoważeniu ogniw, które pojawia się w trakcie ich użytkowania, i które jest zwykle następstwem zjawiska ich samorozładowania się.

2.3. Aktywne balansowanie ogniw

Alternatywą pasywnej metody jest aktywne balansowanie ogniw (rys. 2). Polega ono na zastosowaniu zewnętrznego układu przeznaczonego do aktywnego przenoszenia energii pomiędzy ogniwami. Metodę aktywnego balansowania ogniw można stosować w większości nowoczesnych ogniw z grupy litowej [3].



Rys. 2. Obwód aktywnego balansowania ogniw [3]

Stosowanych jest wiele metod aktywnego balansowanie ogniw i są one w różny sposób dzielone. Ze względu na przepływ energii, metody te są grupowane w pięciu podstawowych podkategoriach: bocznikowanie ogniwa, ogniwo do ogniwa, ogniwo do baterii, bateria do ogniwa i ogniwo do baterii i do ogniwa (ang. cell bypass, cell to cell, cell to pack, pack to cell and cell(s) to pack to cell(s)) [4].

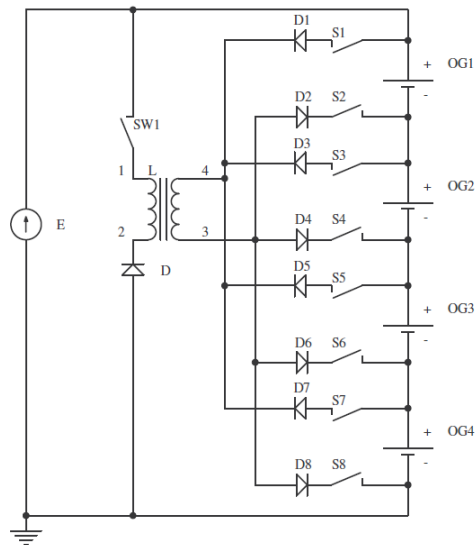
Z metod aktywnego balansowania ogniw, do prezentacji w artykule, zostały wybrane dwie: metoda bateria do ogniwa (pack to cell) i ogniwo do ogniwa (cell to cell).

2.3.1. Metoda bateria do ogniwa

Metoda bateria do ogniwa polega na użyciu transformatora między baterią a ogniwami. Z baterii jest pobierana energia i przekazywana wybranemu ogniwu lub wszystkim ogniwom w zależności od wersji.

Transformacja energii do pojedynczego ogniwa

Działanie polega na użyciu transformatora, którego uzwojenie pierwotne jest podłączone do całego pakietu ogniw, a uzwojenie wtórne poprzez prostownik, i za pomocą kluczy tranzystorowych jest podłączane do ogniwa, które zostało wybrane przez sterownik elektroniczny. Energia przekazywana jest w postaci krótkich impulsów. Ta metoda pozwala na szybkie wyrównywanie poziomu naładowania poszczególnych ogniw lecz jej sprawność jest niska z powodu strat przełączeniowych i magnetycznych (rys. 3).

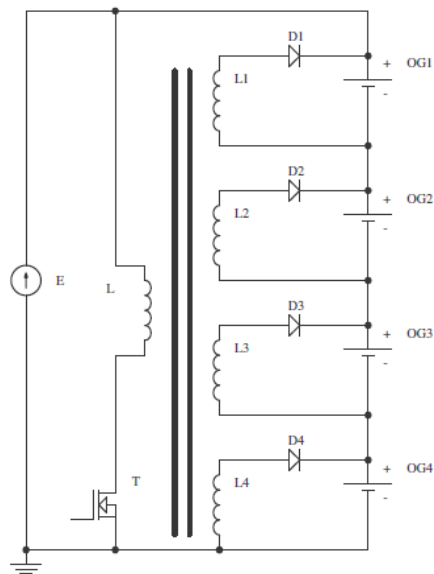


Rys. 3. Obwód aktywnego balansowania ogniw metodą transformatora z przełączalnym uzwojeniem wtórnym [3]

Transformacja energii do wszystkich ogniw

Ta wersja wymaga użycia specjalnie wykonanego transformatora, posiadającego wspólny rdzeń pomiędzy uzwojeniem pierwotnym a uzwojeniami wtórnymi. Uzwojenie pierwotne transformatora jest przyłączane do całej baterii, natomiast uzwojenia wtórne, których liczba musi być równa liczbie ogniw w baterii, są przyłączane do poszczególnych ogniw. Takie połączenie powoduje, że napięcie na uzwojeniach wtórnych jest średnią arytmetyczną napięć wszystkich ogniw.

Zaletą tej metody jest szybkie zbalansowanie baterii z dużą liczbą ogniw, przy minimalnych stratach (rys. 4). Wadą tej metody jest potrzeba zastosowania skomplikowanego transformatora oraz dużej liczby prostowników (dla każdego ogniwa) oraz fakt, że energia do balansowania pobierana jest z całej baterii ogniw.



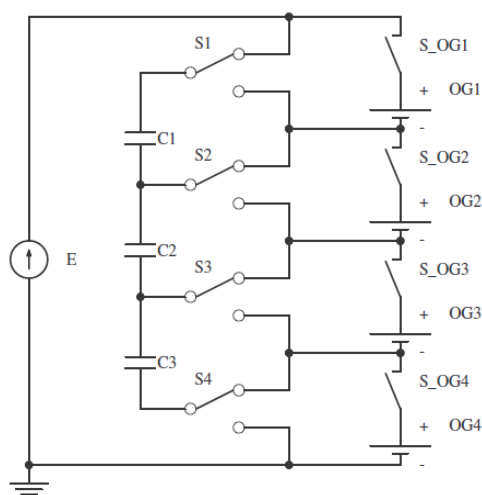
Rys. 4. Obwód aktywnego balansowania ogniw metodą transformatora wielouzwojeniowego [3]

2.3.2. Metoda ogniwo do ogniwa

Metoda ogniwo do ogniwa, polega na transferze energii bezpośrednio z ogniwa o najwyższym poziomie naładowania, do ogniwa o najniższym poziomie naładowania. Tę metodę można zrealizować w różny sposób.

Przełączany kondensator

W tej metodzie elementem magazynującym energię jest kondensator. Istotą działania tego układu jest odbieranie porcji energii z jednego ogniwa, chwilowym przechowaniem jej w kondensatorze, a następnie oddaniu jej do kolejnego ogniwa. Układ sterowania łączy kondensator kolejno z każdym ogniwem za pośrednictwem kluczy tranzystorowych. W zależności od różnicy potencjałów pomiędzy ogniwami, kondensator oddaje lub przyjmuje energię. Następują kolejne przełączenia, aż do ostatniego ogniwa, a następnie cykl jest powtarzany do czasu zbalansowania baterii. Kondensator uśrednia napięcia pomiędzy ogniwami. Ta metoda jest mało wydajna, ponieważ różnice napięć pomiędzy ogniwami w baterii są minimalne (rzędu miliwoltów). Jej zastosowanie ogranicza się do baterii o niewielkiej liczbie ogniw i małej pojemności (rys. 5).

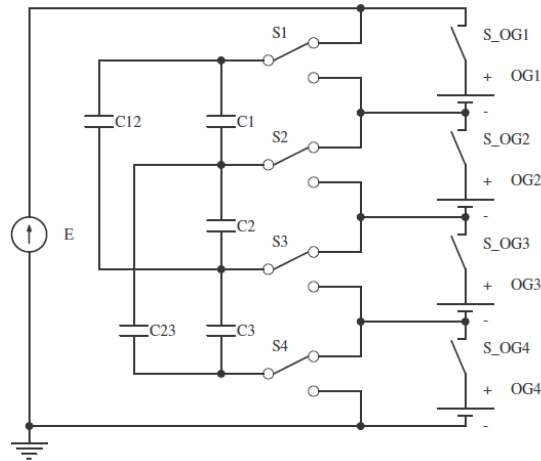


Rys. 5. Metoda przełączanego kondensatora [3]

Główną zaletą tej metody jest duża wydajność, nieskomplikowany układ elektroniczny oraz możliwość przełączania dużych prądów. Natomiast wadą jest mała prędkość przełączania kondensatora, spowodowana stratami czasu na naładowanie się kondensatora.

Przełączany podwójny kondensator

Ta metoda jest rozwiniętą wersją metody przełączanego kondensatora. Różni się tym, że oprócz kondensatorów połączonych równolegle przez wyłączniki do ogniw, są jeszcze połączone kondensatory równolegle do dwóch ogniw jednocześnie (rys. 6). Takie połączenie zmniejsza czas reakcji całego układu o 50%. Posiada ona podobne zalety i wady jak metoda przełączanego kondensatora.



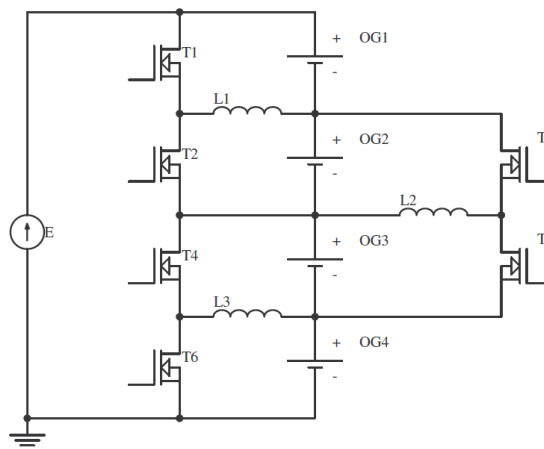
Rys. 6. Metoda podwójnego przełączanego kondensatora [3]

Zaletą układu są mniejsze pojemności kondensatorów i mniejsze prądy wyrównawcze oraz większy przepływ energii między ogniwami całej baterii. Natomiast główną wadą jest mała prędkość łączenia między kondensatorami oraz większe straty czasu związane z naładowaniem się kondensatorów.

Modulator sygnału PWM

Bocznikowanie za pomocą PWM (Pulse Width Modulation) nie opiera swojego działania na rozpraszaniu energii. W tej metodzie, system zarządzania baterią ogniw (BMS) wykrywa różnice napięć na dwóch sąsiednich ogniwach, aby umożliwić transfer energii z ogniwa o najwyższym napięciu do ogniwa z najniższym napięciem. Energia jest najpierw przenoszona z ogniwa o najwyższym napięciu do indukcyjności, w której jest przechowywana, a następnie indukcyjność wyładowuje energię do ogniwa o najniższym napięciu. Transfer energii i kierunek przepływu jest kontrolowany przez mikrokontroler, który poprzez aktywowane sygnałem PWM, steruje odpowiednimi tranzystorami (rys. 7).

Zaletą tej metody jest przepływ dużej ilości energii między ogniwami całej baterii, natomiast wadą takiego układu jest konieczność precyzyjnego pomiaru napięcia.

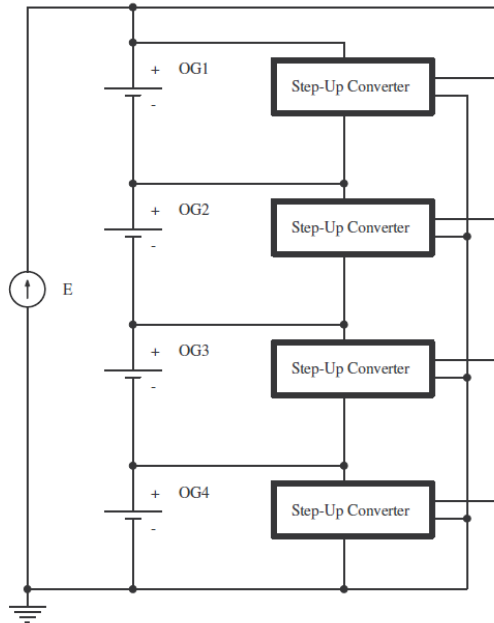


Rys. 7. Bocznikowe sterowanie przez PWM [3]

Metoda konwertera podwyższającego napięcie

Ta metoda wykorzystuje osobny konwerter wzmacniający do usunięcia nadmiaru energii z pojedynczego ogniwa na rzecz pozostałych ogniw wchodzących w skład baterii. Konwertery są podłączone na zaciskach każdego z ogniw w celu ich wyrównania. Wyjścia konwerterów są wspólnie połączone z całością baterii. W trakcie pomiaru napięcia ogniw, system BMS steruje konwerterami, aby te wyrównywały poziom naładowania ogniw.

Zaletą tej metody jest pobieranie energii tylko z jednego ogniwa, a nie z całej baterii ogniw, co daje małe straty energii, natomiast wadą - użycie skomplikowanej elektroniki sterującej, co może spowodować wzrost kosztów całego urządzenia (rys. 8).

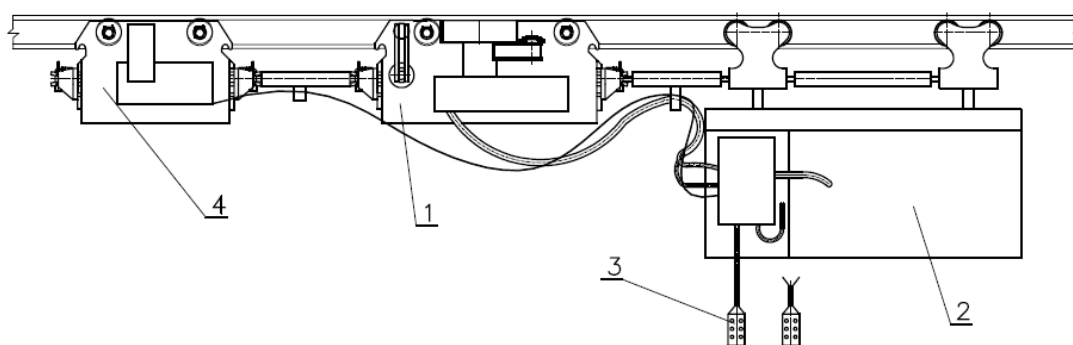


Rys. 8. Obwód aktywnego równoważenia ogniw metodą konwertera podwyższającego napięcie [5]

3. System nadzorujący i zarządzający baterią ogniw stosowany w podwieszonym ciągniku akumulatorowym PCA-1

Obecnie stosowany system nadzorujący i zarządzający baterią ogniw z aktywnym układem balansowania jest wykonany na bazie aktywnej metody balansowania ogniw typu bateria do ogniwa (pack to cell). Przepływ energii wykonany jest dzięki transformacji energii przy pomocy transformatora ze wspólnym rdzeniem do pojedynczego ogniwa.

System BMS został zastosowany w podwieszonym ciągniku akumulatorowym PCA-1, którego źródłem zasilania jest bateria litowo-jonowa, składająca się z 15 ogniw połączonych szeregowo ze sobą, o napięciu 48V DC. Zespoły czterech baterii o łącznej energii 150 kWh umieszczone są we wnętrzu specjalnej skrzyni. Każdy z czterech zestawów bateryjnych stanowi niezależne źródło zasilania dla jednego wózka napędowego (rys. 9).



Rys. 9. Widok ogólny podwieszanego ciągnika akumulatorowego PCA-1

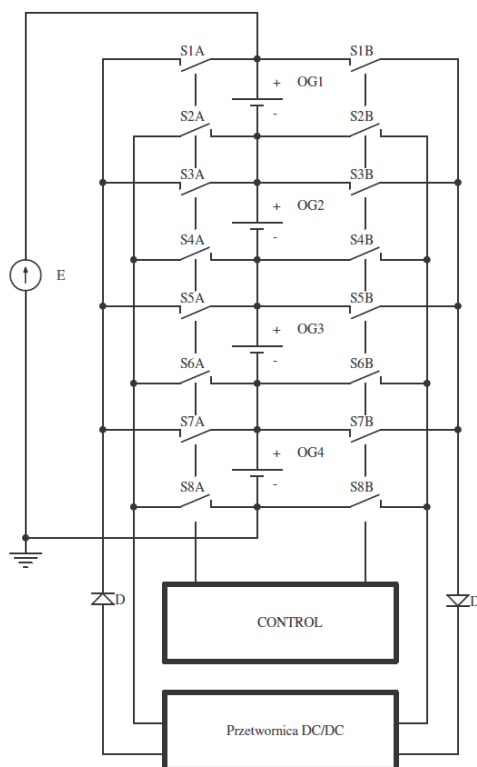
Podwieszany ciągnik akumulatorowy PCA-1 składa się z wózka napędowego poz. 1, zespołu zasilania poz. 2, w którego skład wchodzi bateria ogniw oraz urządzenia towarzyszące (systemy sterowania, zabezpieczeń, ładowania, układy elektroniczne itp.), kasety sterowania poz. 3 (alternatywnie panel zdalnego sterowania radiowego) oraz z wózka hamującego poz. 4.

4. Koncepcja nowego systemu nadzorującego i zarządzającego baterią ogniw

Nowy system nadzorujący i zarządzający baterią ogniw z aktywnym układem balansowania będzie wykonany na bazie aktywnej metody balansowania ogniwo do ogniwa (cell to cell). Założono, że w metodzie ogniwo do ogniwa są mniejsze straty energii niż w metodzie bateria do ogniwa, ponieważ energia przenoszona jest bezpośrednio z ogniwa o najwyższym napięciu do ogniwa z najniższym napięciem. Natomiast w metodzie bateria do ogniwa, stosowanej obecnie, energia pobierana jest ze wszystkich ogniw i przekazywana do ogniwa najsłabszego (rys. 10). System nadzorujący BMS, w skład którego będzie wchodził elektroniczny system zarządzania, będzie spełniać następujące funkcje:

- ochrona baterii ogniw przed uszkodzeniem związanym z głębokim rozładowaniem, przeładowaniem lub przegrzaniem,
- przedłużenie żywotności baterii ogniw,
- utrzymanie pożądanego stanu naładowania baterii,
- współdziałanie z oprogramowaniem zewnętrznym.

Działanie systemu nadzorującego BMS będzie polegało na aktywnym balansowaniu ogniw. Kontrolowane będą napięcia poszczególnych ogniw podczas uruchamiania i pracy maszyny oraz doładowywane będzie najsłabsze ogniwo dla wyrównania poziomu naładowania we wszystkich ogniwach baterii.



Rys. 10. Schemat systemu nadzorującego i zarządzającego baterią ogniw z aktywnym balansowaniem, metodą ogniwo do ogniwa [6]

Bateria ogniw będzie zrównoważona wówczas, gdy wszystkie ogniwa będą miały na ich zaciskach taką samą wartość napięcia. Zrównoważenie ogniw poprawi wydajność baterii wydłużając tym samym jej żywotność. System zabezpieczy całą baterię przed przeładowaniem ogniwa o najwyższym poziomie zgromadzonej energii.

Wartość napięcia poszczególnych ogniw będzie monitorowana przy pomocy mikrokontrolera i przetwornika analogowo-cyfrowego. Jeżeli napięcie na określonym ogniwie będzie niższe od wartości napięcia na pozostałych lub będzie niższe od napięcia znamionowego ogniwa, zostanie do niego podłączona przetwornica, która będzie pobierała energię z ogniwa najbardziej naładowanego. Doładowanie ogniwa będzie trwało do momentu, w którym napięcie na nim zrówna się z wartością napięcia na pozostałych ogniwach baterii. Wtedy ładowanie ogniwa zostanie przerwane.

W momencie przekroczenia dopuszczalnych wartości napięcia (na ogniwach) system BMS będzie wysyłał ostrzeżenie do urządzenia zasilanego lub będzie mógł wyłączyć całą baterię. Zapobiegnie w ten sposób uszkodzeniu baterii w wyniku jej przeładowania, głębokiego rozładowania albo przegrzania. System BMS będzie pełnił również funkcję miernika poziomu naładowania baterii, poprzez pomiar napięć na poszczególnych ogniwach i sumowaniu tych napięć. Dodatkowo system będzie optymalizować przebieg procesu ładowania wszystkich ogniw.

System zostanie wyposażony w mikrokontroler nadzorujący. W ten sposób zapobiegnie ewentualnym awariom związanym z nieprawidłowym działaniem mikrokontrolera sterującego.

System BMS będzie informować o parametrach technicznych baterii takich jak: pojemność (poziom energii), napięcie, temperatura, pobór prądu i/lub będzie przekazywać ostrzeżenia za pośrednictwem interfejsu transmisji danych typu RS232 i CAN.

5. Podsumowanie

W celu zabezpieczenia i zwiększenia niezawodności użytkowania baterii ogniw litowo-jonowych niezbędnym jest system kontroli i nadzorowania w czasie ich użytkowania.

Dla zastosowań w urządzeniach i maszynach górniczych pracujących w wyrobiskach kopalń, wybrano metodę aktywnego balansowania ogniw.

Koncepcja systemu do nadzorowania pracy baterii ogniw (BMS) będzie przydatna w przypadku zastosowania ogniw wrażliwych na przeładowanie, z grupy litowych. System BMS zabezpieczy baterię ogniw przed skutkami nierównomiernego ich doładowywania oraz przed przeładowaniem.

Literatura

- [1] Kurpiel W.: System nadzorujący baterie akumulatorów BMS, ITG KOMAG, Gliwice 2014 (materiały niepublikowane)
- [2] Kurpiel W., Polnik B., Miedziński B.: System nadzorujący pracę baterii akumulatorów (BMS) w celu zwiększenia bezpieczeństwa ich funkcjonowania i żywotności stosowanych ogniw. *Mech. Autom. Gór.* 2014 nr 5
- [3] Gallardo-Lozano J., Romero-Cadaval E., M. Milanes-Montero I., Miguel A., Guerrero-Martinez: „Battery equalization active methods” - University of Extremadura, School of Industrial Engineering, Avda. Elvas s/n, 06006 Badajoz, Spain. – *The International Journal on the Science and Technology of Electrochemical Energy Systems*
- [4] Jian Cao, Nigel Schofield, Ali Emadi: „Battery Balancing Methods: A Comprehensive Review” - IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC, September 3-5, 2008, Harbin, China
- [5] Daowd M., Noshin Omar, Van Den Bossche P., and Van Mierlo J.: Passive and Active Battery Balancing comparison based on MATLAB Simulation, 7th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC'11, 2011
- [6] Kurpiel W.: Trwałość i bezpieczeństwo pracy baterii ogniw litowych z aktywnym systemem balansowania w układach zasilania maszyn górniczych pracujących w atmosferze wybuchowej. W: Materiały na konferencję: SEMAG 2017 "Automatyka i elektroenergetyka w przemyśle wydobywczym", Mysłakowice, 29-31 maja 2017 s. 6-22