

## Układ aktywnego balansowania baterii ogniw litowych przeznaczony do górnictwyczych maszyn mobilnych

Sławomir Bartoszek  
Jerzy Jura

Active Battery Management System for lithium cells designed for the mobile mining machines

Streszczenie:

W artykule opisano problematykę aktywnego balansowania ogniw. Przedstawiono układ aktywnego balansowania (BMS) ogniw baterii przeznaczony do zastosowania w napędach elektrycznych maszyn górnictwyczych, tj. wozów wiercących i ładowarek, uwzględniając korzyści płynące z zastosowania powyższej techniki. Omówiono strukturę układu, z uwzględnieniem jego rzeczywistej formy i wyników badań. Omówiono funkcjonalność poszczególnych modułów układu BMS, umożliwiającą przekazywanie energii i jej właściwy rozkład pomiędzy ogniwami.

Słowa kluczowe: górnictwo, bezpieczeństwo, napęd elektryczny, ogniwa litowo-jonowe, aktywny BMS

Keywords: mining industry, safety, electric drive, lithium-ion cells, active BMS

Abstract:

The problems of active management of cells is described. The Battery Management System (BMS) for the battery cells used in electric drives of mining machines i.e. drilling jumbos and loaders is presented indicating the advantages of using this technology. Structure of the system in its real form and the test results are described. Functionality of each BMS module for transfer of energy and its proper distribution among the cells is discussed.

### 1. Wprowadzenie

Nowoczesne akumulatory wyposażone w baterie ogniw (baterie ogniw litowo-jonowych) są coraz częściej stosowane w napędach maszyn. Wysoka gęstość energii baterii litowych oraz mniejsza masa i gabaryty mają bowiem istotne znaczenie w aspekcie konstrukcji i funkcjonowania całej maszyny. Należy jednak zauważyć, że niewłaściwe użytkowanie baterii ogniw litowo-jonowych może prowadzić do ich uszkodzenia. Stąd zapewnienie bezpieczeństwa użytkowania i niezawodności pracy oraz wydłużenie żywotności wymaga stosowania systemów nadzoru parametrów ich pracy. Układy nadzorujące pracę baterii ogniw nazywane są w skrócie BMS (ang. Battery Management System). Podstawowym zadaniem ww. systemów jest niedopuszczenie do uszkodzenia ogniw na skutek przeładowania, nadmiernego rozładowania lub przegrzania. Układ BMS powinien zatem kontrolować parametry pracy ogniw, tj. napięcie, prąd oraz temperaturę, a w przypadku przekroczenia dopuszczalnych wartości, ostrzegać lub odłączyć baterię. Nie mniej ważną funkcją układu BMS jest balansowanie ogniw celem zwiększenia ich wydajności i żywotności. Napięcie pojedynczego ogniwa litowego wynosi około 3,2 V, stąd baterie w napędach maszyn elektrycznych składają się z ich dużej liczby, łączonych szeregowo [3, 4, 5].

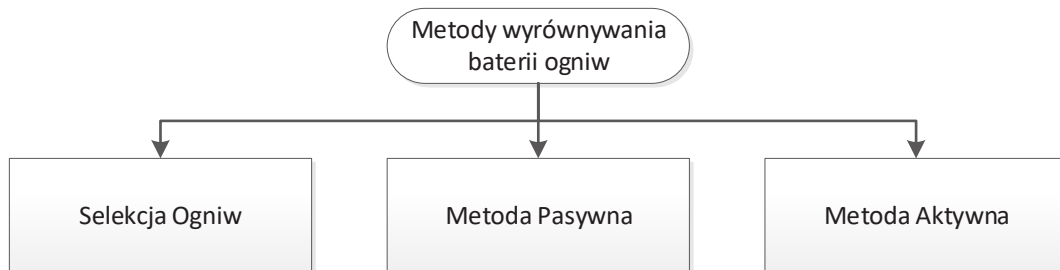
Potrzeba balansowania ogniw wynika z różnic pomiędzy pojedynczymi ogniwami pod względem poziomu naładowania, pojemności i rezystancji, wynikających z tolerancji produkcyjnych lub warunków pracy. Różnice te mają tendencję do powiększania się wraz z czasem eksploatacji. Słabsze ogniwa podczas ładowania są przeciążane, przez co stają się jeszcze słabsze, dopóki nie ulegną awarii i nie spowodują przedwczesnego uszkodzenia całej

baterii. Jeżeli jedno lub więcej ogniw jest niedopasowanych, wtedy cały akumulator jest niezbalansowany i ma niską pojemność, gdyż pojemność najsłabszego ogniwa determinuje całkowitą pojemność akumulatora. Równoważenie ogniw poprawia zatem wydajność akumulatorów i wydłuża ich żywotność [3, 4].

W niniejszym artykule opisano opracowany w ITG KOMAG aktywny układ BMS przeznaczony do baterii ogniw napędu samojezdnego wozu stosowanego w górnictwie. Przedmiotowa bateria złożona jest z 224 ogniw LiFePO<sub>4</sub> i charakteryzuje się napięciem znamionowym 716,8V oraz energią 72kWh [1].

## 2. Metody balansowania ogniw

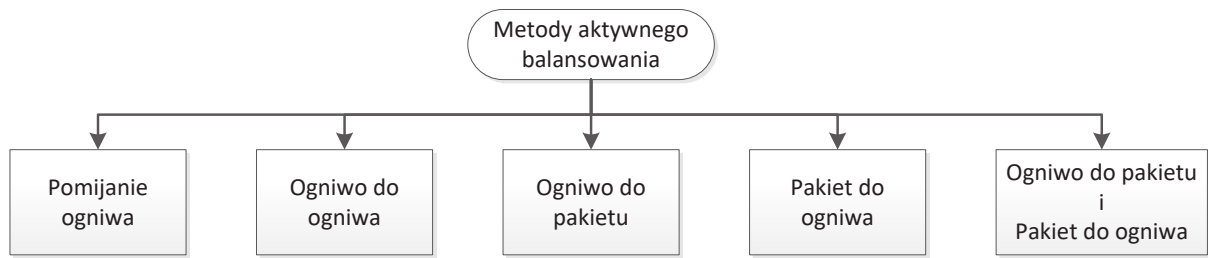
Metody balansowania, można podzielić na trzy zasadnicze (rys. 1): doboru ogniw (budowanie baterii poprzez wybranie ogniw o najbardziej zbliżonych parametrach), pasywne (odbieranie energii z nadmiernie naładowanych ogniw) i aktywne (równoważenie ładunku zgromadzonego w ogniwach poprzez przekazywanie energii pomiędzy ogniwami).



Rys. 1. Metody balansowania ogniw baterii [3]

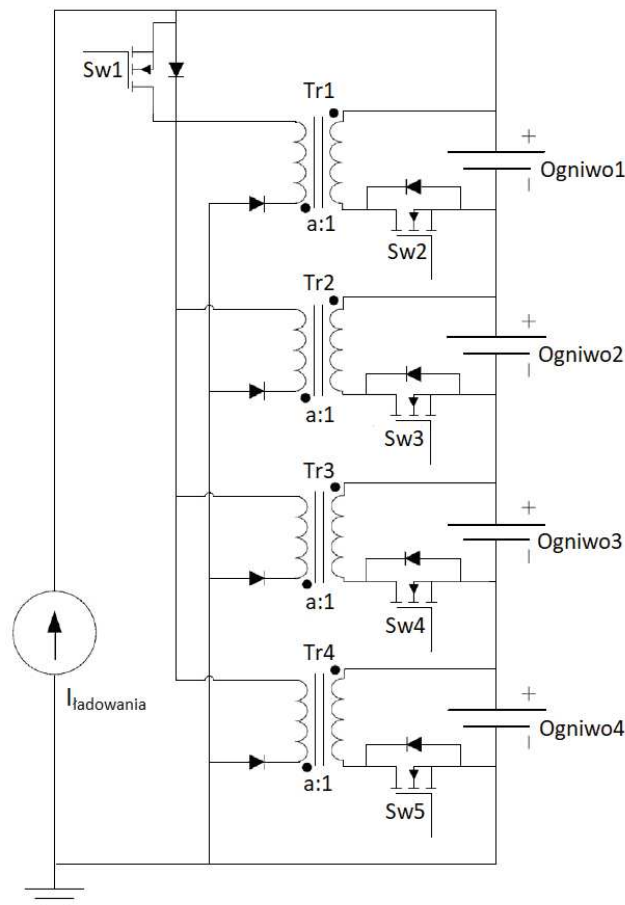
Większość stosowanych obecnie układów zarządzania bateriami ogniw wykorzystuje metodę pasywną, opartą na zasadzie rozpraszania nadmiarowej energii elektrycznej w postaci ciepła. Jest to metoda niekorzystna, szczególnie w pojazdach przeznaczonych do górnictwa, które powinny spełniać wymagania dyrektywy ATEX, w tym ograniczenia temperaturowe elementów będących w kontakcie z atmosferą kopalnianą. Aktywne układy balansowania działają na zasadzie odbierania energii z nadmiernie naładowanych ogniw i oddawaniu jej do innych, niedoładowanych. Ogranicza to, w znacznym stopniu, niekorzystne zjawisko związane z rozpraszaniem energii, zapewnia oszczędność energii elektrycznej i stwarza optymalne warunki pracy ogniw, skutkujące wydłużeniem żywotności baterii ogniw.

Istnieje kilka metod aktywnego balansowania ogniw (rys. 2), związanych ze sposobem przekazywania energii pomiędzy ogniwami. Wyróżnia się: odłączanie nadmiernie naładowanego ogniwa (Pomijanie ogniwa), przekazywanie energii pomiędzy pojedynczymi ogniwami (Ogniwo do ogniwa), z ogniwa do całego pakietu (Ogniwo do pakietu), z pakietu do pojedynczego ogniwa (Pakiet do ogniwa) i metoda kombinowana z przekazywaniem energii z ogniwa do pakietu, a następnie z pakietu do innego ogniwa (Ogniwo do pakietu i Pakiet do ogniwa) [2, 3, 4, 6].



Rys. 2. Rodzaje metod aktywnego balansowania ogniów [3]

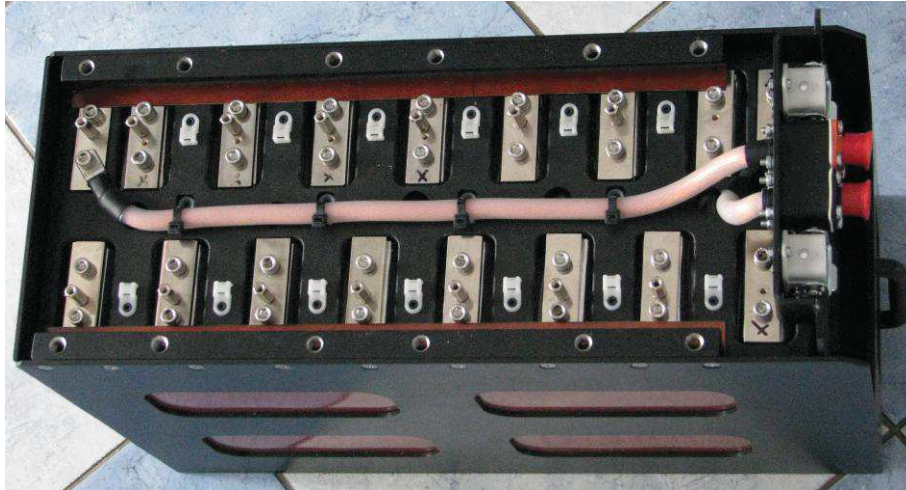
W opracowanym w ITG KOMAG rozwiązaniu ogniwa baterii zabezpieczono układem typu BMS, z zastosowaniem metody hybrydowej „Pakiet do ogniwa” i „Ogniwo do pakietu”, której działanie przedstawiono na rysunku 3. Elementem układu umożliwiającym przekazywanie energii pomiędzy ogniwami jest transformator zainstalowany w obwodzie każdego z nich. Metodę rozbudowano ze względu na znaczną liczbę ogniów i potrzebę przekazywania energii pomiędzy nimi.



Rys. 3. Balansowanie energią ogniów baterii za pomocą metody „Ogniwo do Pakietu” z wykorzystaniem wielu transformatorów [3]

### 3. Struktura opracowanego układu BMS

Baterię ogniów podzielono na 14 pakietów, po 16 ogniów. Pojedynczy pakiet, którego konstrukcję dostosowano do konkretnej maszyny, przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Pakiet 16 ogniw baterii [1]

Opracowany układ BMS będzie zabudowywany bezpośrednio na pakiecie ogniw, przez co nie będzie potrzeby prowadzenia znacznej liczby przewodów, co jest istotne w baterii o złożonej strukturze. Układ BMS umożliwi balansowanie ogniw zarówno pojedynczego pakietu, jak również wszystkich pakietów.

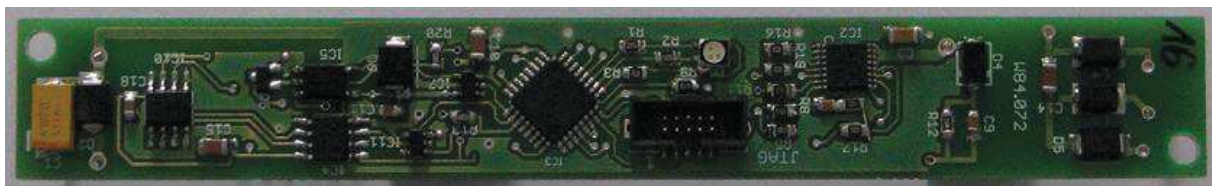
Układ BMS składa się z modułów:

- przyporządkowanych do każdego ogniwa (BMS-S) – służą do pomiaru parametrów ogniwa i fizycznej realizacji procesu balansowania, czyli przekazywania energii do innych ogniw,
- instalowanych na pakiecie – płyta montażowa integrująca wszystkie moduły BMS-S pakietu, nie posiada logiki programowalnej, posiada obwody związane z komunikacją pomiędzy modułami i wymianą energii pomiędzy pakietami,
- nadrzędnego układu sterującego (BMS-M) – służy do sterowania pracą wszystkich modułów składowych układu BMS oraz do nadzoru parametrów pracy baterii.

Dane pomiędzy modułami wymieniane są za pomocą interfejsu szeregowego RS485 i protokołu MODBUS RTU, natomiast moduł nadrzędny BMS-M komunikuje się z układem sterowania maszyny za pomocą interfejsu CAN.

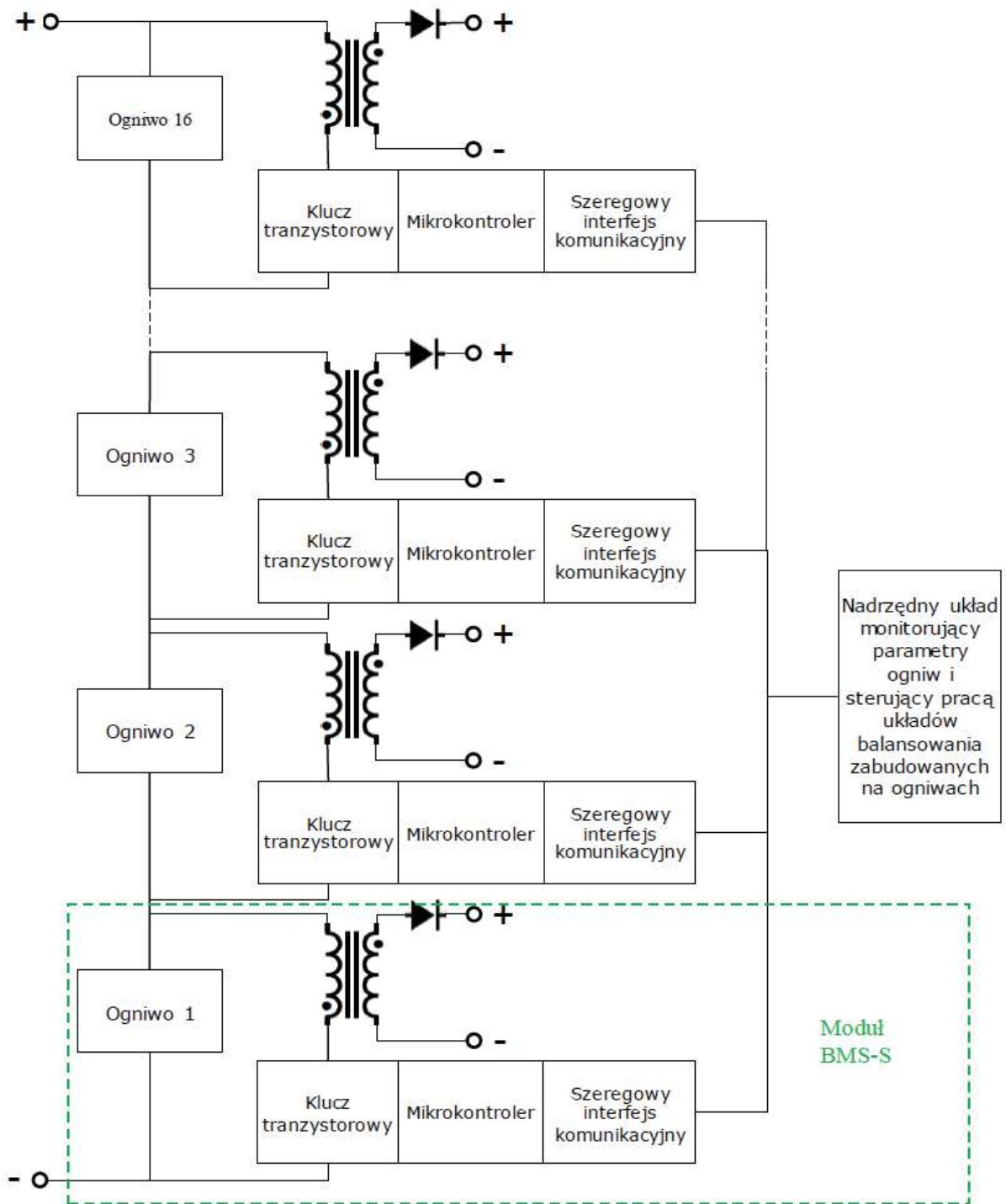
#### 4. Balansowanie ogniw w pakiecie

Układ BMS przeznaczony do pojedynczego pakietu ogniw składa się z płyty bazowej, na której zamocowano 16 modułów BMS-S (rys. 5). Moduły BMS-S, przyporządkowane do każdego ogniwa, służą do pomiaru jego parametrów i fizycznej realizacji procesu balansowania, czyli przekazywania energii do innych ogniw.



Rys. 5. Moduł BMS-S współpracujący z pojedynczym ogniwem [1]

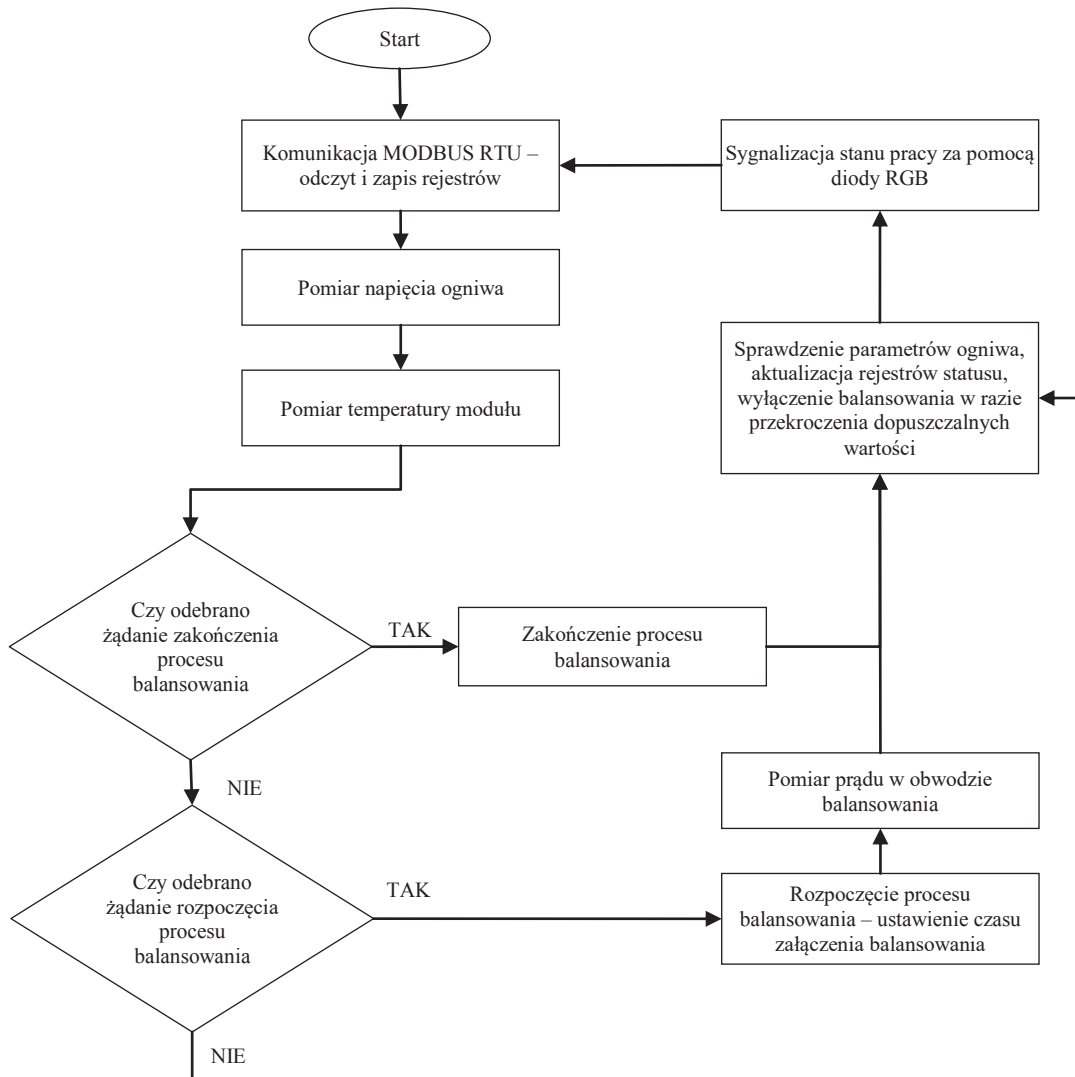
Strukturę układu BMS zainstalowanego na pakiecie 16 ogniw przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Struktura aktywnego układu BMS zarządzającego energią ogniw baterii (pojedynczego pakietu)

Algorytm działania modułu BMS-S przedstawiono na rysunku 7.





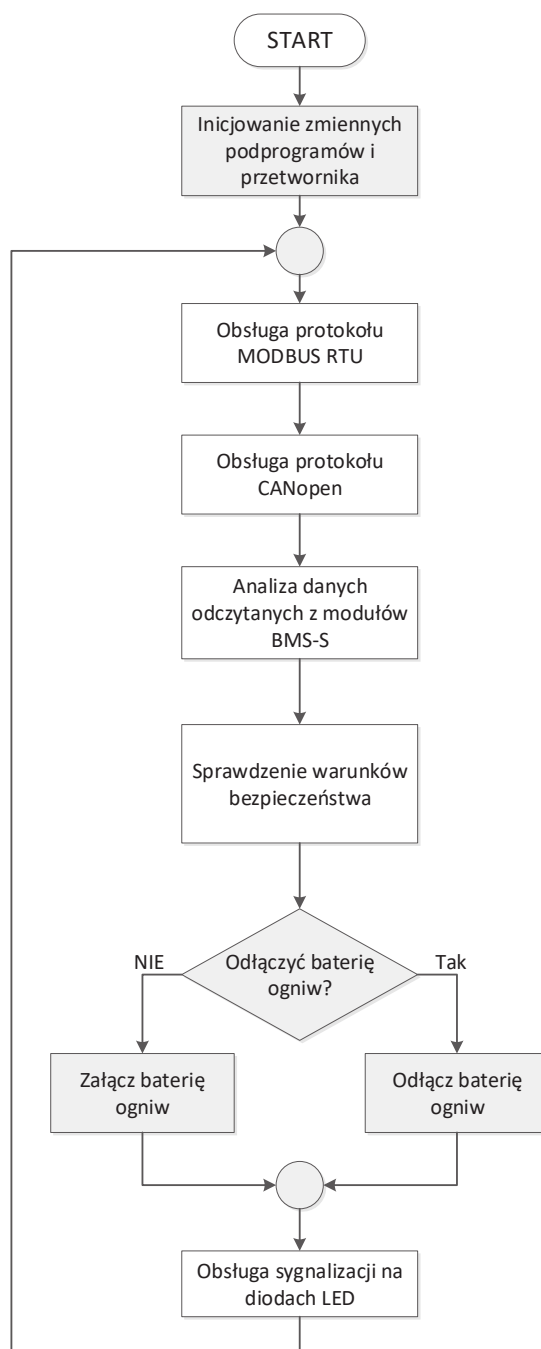
Rys. 7. Algorytm działania modułu BMS-S [1]

Wszystkie moduły układu BMS zarządzane są z poziomu modułu nadrzędnego BMS-M (rys. 8), który decyduje o załączeniu i czasie trwania balansowania na poszczególnych ogniwach,

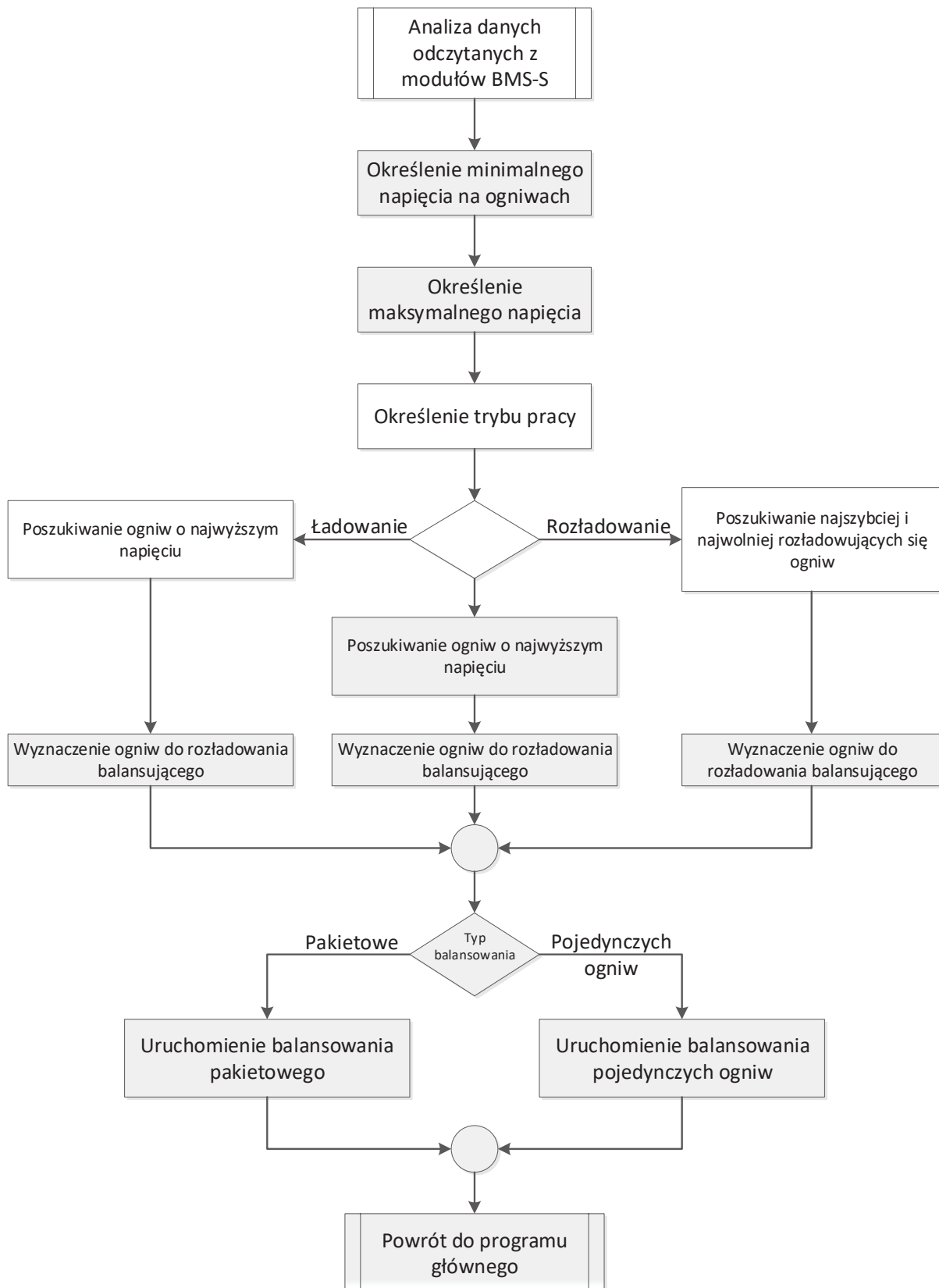


Rys. 8. Moduł nadrzędny BMS-M [1]

Moduł BMS-M wyposażony jest w dwa interfejsy cyfrowe, to jest RS-485 (MODBUS-RTU Master) i CAN (CANopen). Do modułu podłączono przekładnik prądowy, umożliwiającą zliczanie ładunku doprowadzonego i odprowadzonego z baterii oraz zabezpieczenie baterii przed przekroczeniem maksymalnych prądów ładowania i rozładowania. Moduł załącza baterię po sprawdzeniu wszystkich ogniw oraz umożliwia odłączenie baterii w przypadku przekroczenia dopuszczalnych wartości parametrów ogniw. Na rysunku 9 przedstawiono ogólny algorytm działania modułu BMS-M, natomiast na rysunku 10 algorytm procedury związanej z wymianą informacji z modułami BMS-S i nadzorowaniem ogniw.



Rys. 9. Schemat blokowy pętli głównej programu zespołu BMS-M [1]



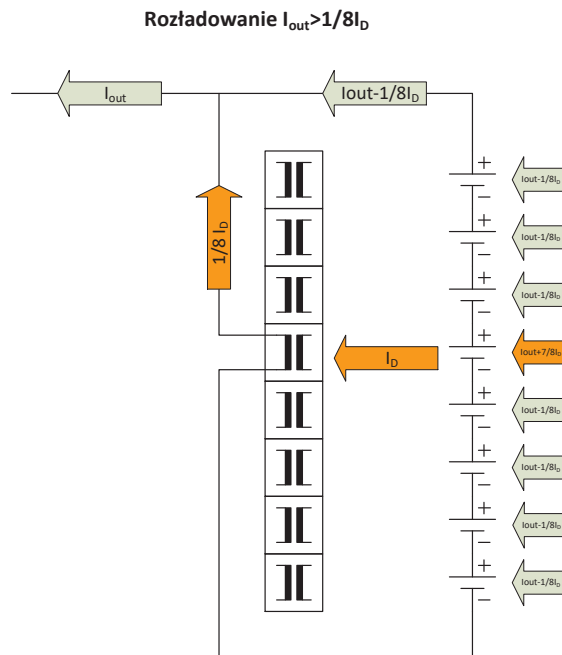
Rys. 10. Algorytm blokowy analizy stanu poszczególnych ogniw [1]

Na rysunku 11 przedstawiono schematycznie rozptył prądu w obwodzie balansowania (na przykładzie 8 ogniw) w trzech różnych przypadkach: podczas rozładowania baterii, gdy prąd obciążenia  $I_{OUT}$  jest większy od prądu z obwodu balansowania ogniwa  $1/8I_D$  (rys. 11a),

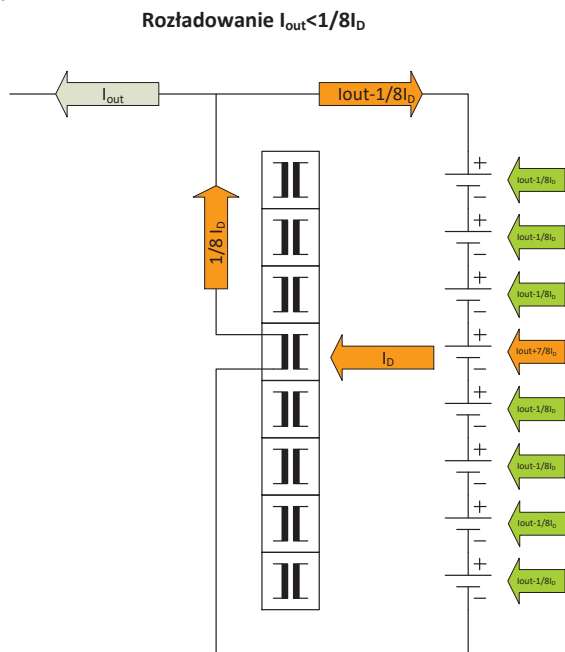


podczas rozładowania baterii, gdy  $I_{OUT} < 1/8I_D$  (rys. 11b) oraz podczas ładowania ogniwa (rys. 11c). Założono załączenie balansowania w obwodzie jednego z ośmiu ogniw.

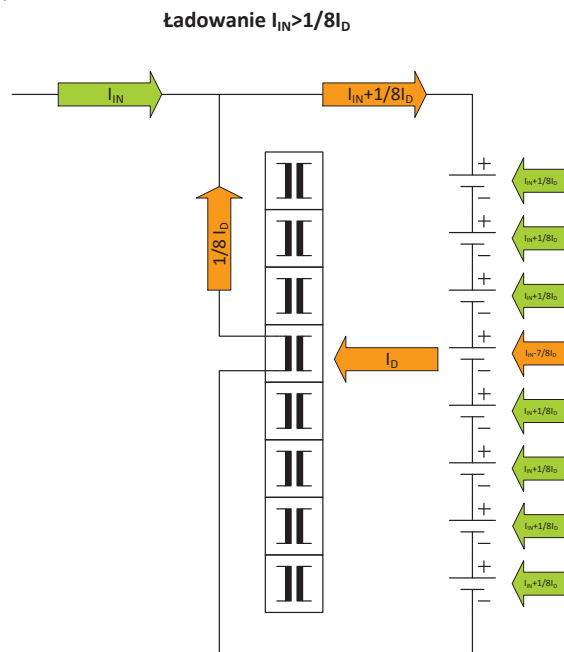
a)



b)



c)

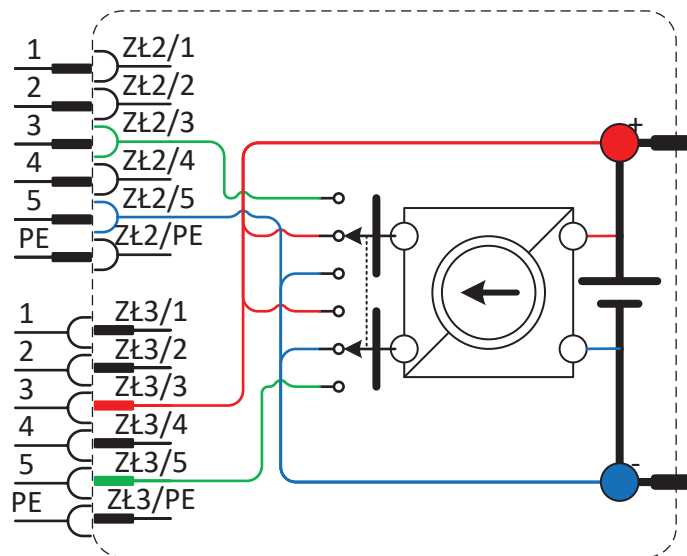


Rys. 11. Sposób przenoszenia ładunku między ogniwami w różnych trybach pracy [1]

## 5. Balansowanie międzypakietowe

Stosowanie wysokich napięć w pakietach wymaga opracowywania systemów hybrydowych – balansowania w obrębie jednego pakietu ogniw oraz pomiędzy pakietami. Dostępne transformatory, niezbędne w przypadku każdego aktywnego systemu balansowania,

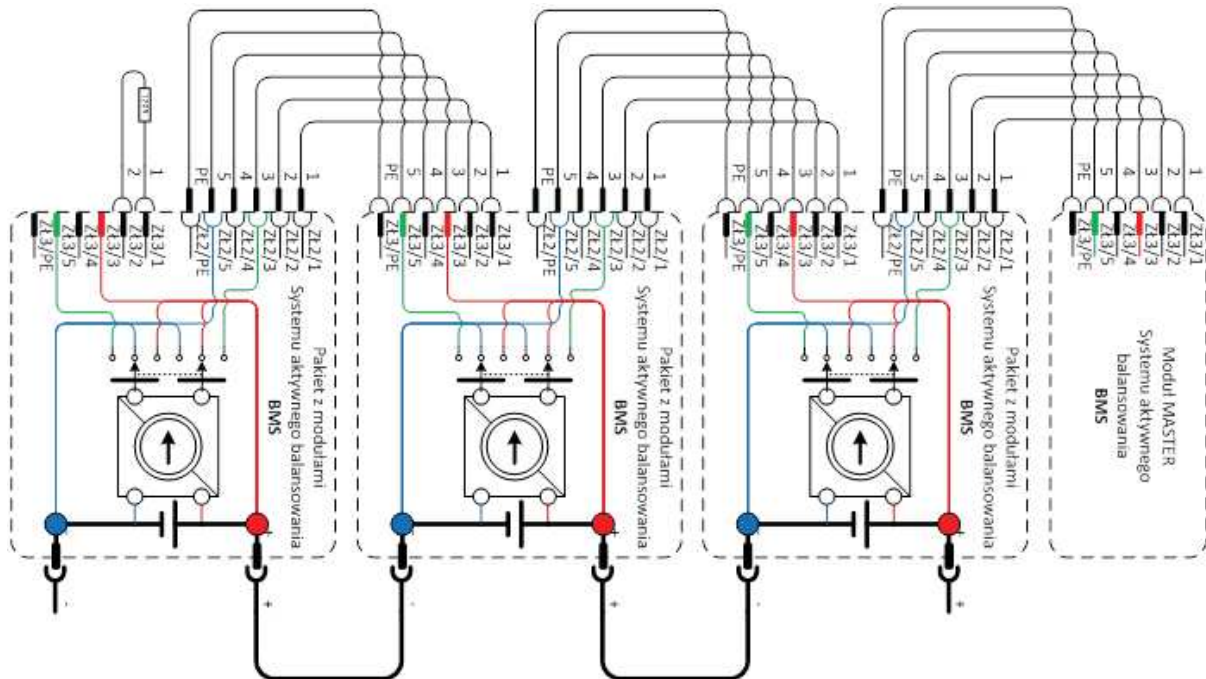
pozwalają najczęściej na tworzenie pakietów zawierających maksymalnie 4, 8, 12 lub 16 ogniw litowych o napięciu znamionowym 3,2 V. Stosowanie baterii (akumulatorów) o napięciu w zakresie od 200 V do 900 V stwarza dwa podstawowe problemy. Pierwszy to brak handlowych elementów, które pozwalałyby na budowę modułów aktywnego balansowania, przy tak dużych napięciach. Drugi to ograniczenie układowe związane z liczbą komunikujących się nadajników i odbiorników podczas transmisji szeregowej RS485 do 32. Rozwiązaniem tych problemów jest opracowany hybrydowy system balansowania aktywnego. Składa się on z pakietów (rys. 12) wyposażonych w dwa przyłącza wysokoprądowe oraz dwa złącza sygnałowe, posiadające również wyprowadzenia do ładowania międzypakietowego.



Rys. 12. Schemat blokowy pakietu ogniw baterii [1]

Zaproponowane rozwiązanie pakietu, oprócz pojedynczych elementów do balansowania ogniw, pozwala na przenoszenie ładunku do sąsiednich pakietów, poprzez dodatkowe połączenia w złączach sygnałowych.

Po połączeniu pakietów (rys. 13) uzyskuje się możliwość przenoszenia ładunku pomiędzy sąsiednimi pakietami. Dodatkowo, pojedynczy pakiet wprowadza obciążenie tylko jednego nadajnika / odbiornika interfejsu RS485.



Rys. 13. Schemat blokowy połączeń między pakietami z zaznaczonymi połączeniami do przekazywania ładunków między pakietami [1]

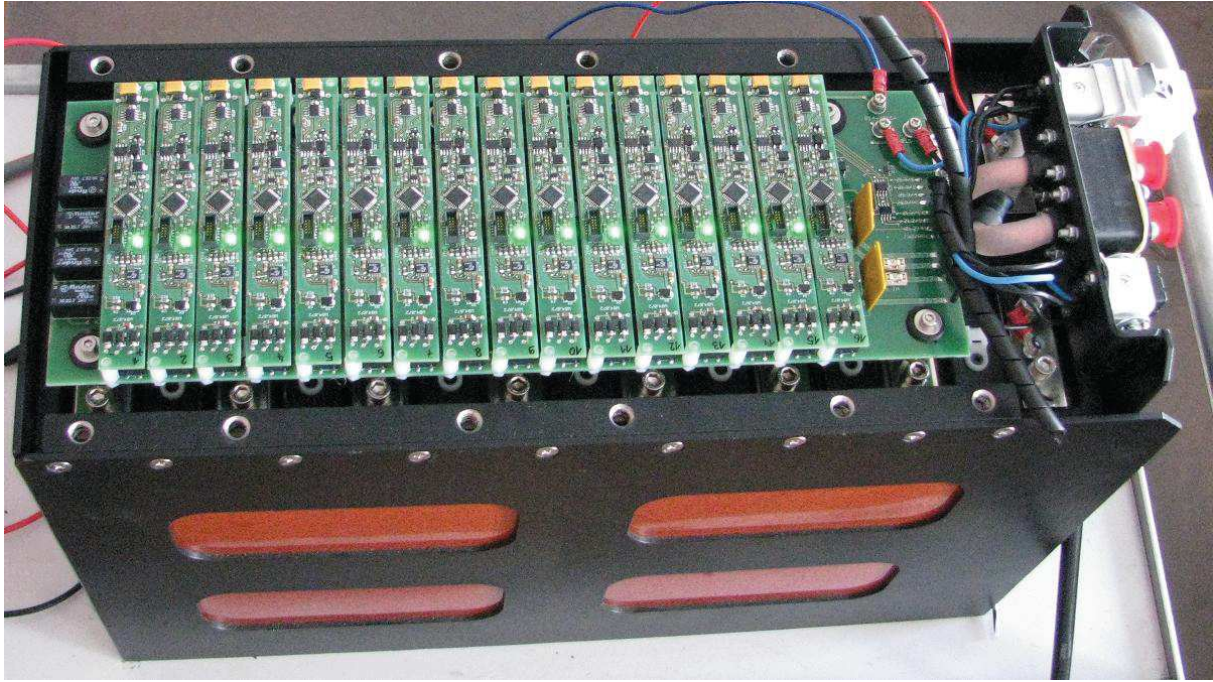
Zarządzanie procesem balansowania pomiędzy pakietami jest realizowane z poziomu modułu nadrzędnego BMS-M, natomiast elementy wykonawcze, umożliwiające właściwe przesyłanie energii pomiędzy nimi, znajdują się na płytach bazowych zabudowanych na pakietach.

Komunikacja z systemem sterowania maszyną odbywa się z wykorzystaniem magistrali CAN. W celu zapewnienia bezpieczeństwa, w związku ze stosowanymi wysokimi napięciami, interfejs CAN posiada izolację galwaniczną, odporną na napięcie do 3 kV. Program modułu master zawiera obsługę interfejsu CAN, zgodnie z protokołem CANopen i wymaganiami norm DS301 i DS419.

## 6. Wdrożenie układu

Przedstawiony układ aktywnego balansowania został zastosowany w górniczej spągłodawce z napędem elektrycznym, której układ napędowy zasilany jest z opisanej wcześniej baterii złożonej z 224 ogniw litowych). Spągłodawarka budowana jest w ramach projektu HYDKOM 75 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014 – 2020. Napęd elektryczny wraz z prezentowanym układem BMS znajdują się w fazie testów laboratoryjnych.

Na rysunku 14 przedstawiono układ BMS zainstalowany na pakiecie ogniw, przygotowany do montażu na wspomnianej maszynie.



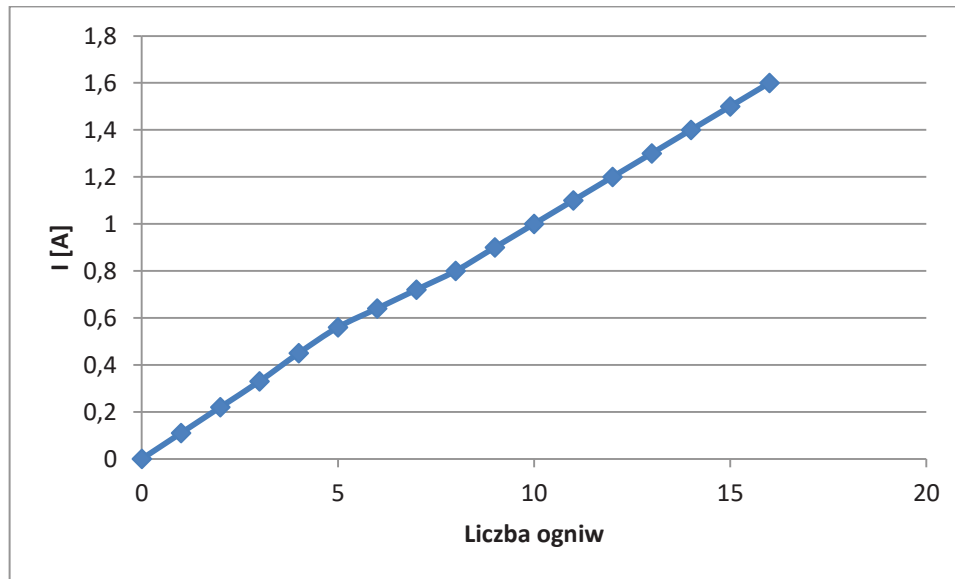
Rys. 14. Układ BMS zainstalowany na pakiecie ogniw [1]

Stan pracy modułów BMS-S sygnalizowany jest za pomocą trójkolorowych diod LED. Kolor zielony sygnalizuje stan komunikacji – światło ciągłe oznacza połączenie, natomiast przerywane jego brak. Kolor niebieski sygnalizuje aktywację procesu przekazywania energii (balansowania), kolor czerwony sygnalizuje błędy i ewentualne nieprawidłowe wartości mierzonych parametrów.

Najważniejszym monitorowanym parametrem ogniw jest wartość ich napięcia. W przypadku przekroczenia zalecanego poziomu, moduł BMS-M sygnalizuje nieprawidłowy stan ogniwa i wymusza wyłączenie baterii z eksploatacji. Jest to realizowane za pomocą stycznika prądu stałego, który powinien być zainstalowany w instalacji elektrycznej maszyny (moduł BMS-M steruje sygnałem załączenia przekaźnika). Dodatkowo, moduł BMS wykrywa stany nieprawidłowej pracy w obwodach balansowania, takie jak: zwarcia i rozwarca. Moduł BMS-M, poprzez przekładnik prądowy, monitoruje prąd na wyprowadzeniach baterii. Porównanie prądu ładowania z napięciem poszczególnych ogniw, a także prędkością jego zmian, pozwala oszacować pojemność poszczególnego ogniwa i wskazać na jego uszkodzone.

Na rysunku 15 pokazano zależność prądu przekazywanego na zaciski pakietu podczas włączania różnej liczby ogniw (układów BMS-S) w tryb balansowania, czyli przekazywania energii z ogniwa do całego pakietu, a tym samym do pozostałych ogniw pakietu.





Rys. 15. Zależność prądu przekazywanego na zaciski pakietu od liczby układów BMS-S włączonych w tryb balansowania [1]

Prąd na zaciskach pakietu, w przypadku pracy w trybie balansowania pojedynczego modułu BMS-S, wynosi około 0,1 A. Jego wartość zmienia się proporcjonalnie do liczby modułów włączanych w tryb balansowania. W przypadku załączenia wszystkich modułów, prąd przekazywany do pakietu wynosi 1,6 A, a wartość prądu pobierana z pojedynczego ogniwa około 2,5 A.

## 7. Podsumowanie

W artykule opisano hybrydowy układ aktywnego balansowania (BMS) ogniw baterii przeznaczonej do zasilania elektrycznych napędów górniczych wozów samojezdnych. Układ został wdrożony w innowacyjnej górniczej spągłodawarce z napędem elektrycznym, w której zastosowano baterię o napięciu znamionowym 716,8 V, złożoną z 224 ogniw litowych podzielonych na 14 pakietów.

Układ składa się z modułów BMS-S, łączonych bezpośrednio do ogniw (za pośrednictwem płyty montażowej) oraz z nadrzędnego modułu sterującego BMS-M. Kontrolę nad pracą całego układu BMS, w tym decyzje o przebiegu procesu balansowania, realizuje mikrokontroler w module BMS-M, natomiast funkcje wykonawcze realizują mikrokontrolery zabudowane w modułach BMS-S zainstalowanych na każdym ogniwie.

Zastosowano aktywną metodę balansowania umożliwiającą przekazywanie energii pomiędzy pojedynczymi ogniwami i ich pakietami, co wpływa na wydłużenie żywotności baterii ogniw, oszczędność energii oraz ograniczenie wydzielania ciepła. Dzięki zastosowaniu magistrali CAN, układ BMS można połączyć z układem sterowania maszyny, przez co użytkownik zyskuje możliwość monitorowania bieżącego stanu pracy baterii.

Konstrukcję przedstawionego układu BMS dopasowano do ogniw LiFePO<sub>4</sub> o pojemności 100Ah zastosowanych w spągłodawarce. Przedstawioną metodę balansowania można z powodzeniem zastosować w innych rozwiązaniach, tj.: zarówno w przypadku baterii złożonych z pojedynczego pakietu (kilku ogniw), jak również tych rozbudowanych, złożonych z wielu pakietów ogniw. Wdrożenie przedstawionego układu BMS na baterii

złożonej z ogniw litowych innego typu, będzie wymagało zmiany konstrukcji mechanicznej układów elektronicznych oraz wprowadzenia modyfikacji w oprogramowaniu modułu nadrzędnego.

## Literatura

- [1] Bartoszek S. i inni: Układ aktywnego zarządzania energią ogniw akumulatora zasilającego górniczy wóz samojezdny, ITG KOMAG, Gliwice 2014 (materiały niepublikowane)
- [2] Cao J., Schofield N., Emadi A.: Battery Balancing Methods: A Comprehensive Review W: IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC, September 3-5, 2008, Harbin, China
- [3] Gallardo-Lozano J., Romero-Cadaval E., Milanes-Montero M I., Guerrero-Martinez M.A.: Battery equalization active methods. Journal of Power Sources 246 (2014) s. 934 – 949
- [4] Hoque M.M., Hannan M.A., Mohamed A., Ayob A.: Battery charge equalization controller in electric vehicle applications: A review Renewable and Sustainable Energy Reviews 75 (2017) s. 1363–1385
- [5] Jaworowska M.: Specjalizowane układy elektroniczne do diagnostyki pakietów ogniw. Elektronika, 2012, nr 7
- [6] Kurpiel W.: Koncepcja systemu nadzorującego i zarządzającego baterią ogniw (BMS) z aktywnym układem ich balansowania. Maszyny Górnicze 2018 nr 1 s. 60-70

---

*dr inż. Sławomir Bartoszek*  
*sbartoszek@komag.eu*

*mgr inż. Jerzy Jura*  
*jjura@komag.eu*

*Instytut Techniki Górniczej KOMAG*  
*ul. Pszczyńska 37, 44-101 Gliwice*