

Wojciech Kurpieł
Bogdan Miedziński
Bartosz Polnik

59

WPŁYW SYSTEMU BALANSOWANIA
NA TRWAŁOŚĆ I BEZPIECZEŃSTWO PRACY
BATERII OGNIW LITOWYCH
W WYBRANYM UKŁADZIE ZASILANIA
MASZYNY GÓRNICZEJ

Prace Naukowe - Monografie



Gliwice 2025

<https://doi.org/10.32056/KOMAG/Monograph2025.2>

**Wojciech Kurpiel
Bogdan Miedziński
Bartosz Polnik**

**Wpływ systemu balansowania
na trwałość i bezpieczeństwo pracy
baterii ogniw litowych
w wybranym układzie zasilania
maszyny górniczej**



*Monografia opublikowana na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa -
- Użycie niekomercyjne 4.0 Międzynarodowe (CC BY-NC 4.0)*

Autorzy:

dr inż. Wojciech Kurpiel – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

prof. dr hab. inż. Bogdan Miedziński – Politechnika Wrocławska

dr inż. Bartosz Polnik – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Recenzenci:

dr hab. inż. Tomasz Trawiński, prof. P.Ś. – Politechnika Śląska

prof. dr hab. inż. Stanisław Jan Kulas – Wojskowa Akademia Techniczna

Redaktor techniczny:

mgr inż. Bogna Kolasińska

mgr Dorota Wierzbicka

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę

Copyright by

Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2025

Wydawca:

Instytut Techniki Górniczej KOMAG

ul. Pszczyńska 37, 44-101 Gliwice

ISBN 978-83-65593-41-2

Spis treści

	str.
1. Wstęp	5
2. Akumulatory i ich podstawowe parametry użytkowe	9
2.1. Ogniwa litowe – budowa, zasada działania i podstawowe parametry.....	10
2.1.1. Zjawisko interkalacji	12
2.1.2. Materiał elektrod i rodzaj stosowanego elektrolitu	12
2.1.3. Zagrożenia związane z eksploatacją ogniw litowych	14
2.1.3.1. Temperatura pracy i przechowywania a trwałość ogniwa litowego	15
2.1.3.2. Przyczyny uszkodzeń ogniw litowych	16
2.1.3.3. Środki bezpieczeństwa i ochrony	19
2.1.3.4. Łączenie baterii	19
3. Technologia ładowania akumulatorów litowych	22
3.1. Sposoby ładowania akumulatorów litowych	22
4. Charakterystyka zagrożeń stosowania ogniw litowych w przemyśle węglowym	26
4.1. Techniczne uwarunkowania środowiskowe podziemi kopalń ...	27
4.1.1. Charakterystyka narażeń	29
4.1.2. Charakter zagrożeń	32
4.1.2.1. Pomieszczenia i/lub strefy zagrożone wybuchem pyłu węglowego	33
4.1.2.2. Pomieszczenia niebezpieczne pod względem pożarowym	33
4.2. Zagrożenia wskutek uszkodzeń urządzeń elektrycznych górniczych	34
4.3. Zagrożenia wskutek uszkodzeń urządzeń mechanicznych górniczych	34
5. Układy zarządzania pracą i balansowania ogniw litowych (BMS)	36
5.1. Balansowanie (równoważenie) ogniw	36
5.1.1. Balansowanie ogniw metodą ich doboru (selekcjonowania)	37
5.1.2. Pasywne balansowanie ogniw	37

5.1.3. Aktywne balansowanie ogniw	39
5.1.3.1. Metoda bocznikowania ogniw	39
5.1.3.2. Metoda ogniwo do ogniwa	42
5.1.3.3. Metoda ogniwo do baterii	43
5.1.3.4. Metoda bateria do ogniwa	45
5.1.3.5. Metoda ogniwo do baterii i do ogniwa	47
6. Kryteria oceny stosowania ogniw litowych w przemyśle węglowym ...	50
7. Badania porównawcze efektywności i bezpieczeństwa pracy układów baterii ogniw litowych	53
7.1. Badania wpływu prądu rozładowania na rozkład temperatury i bezpieczeństwo pracy ogniwa litowego	61
7.2. Badania modelowe na stanowisku laboratoryjnym w symulowanych warunkach pracy i stałych warunkach środowiskowych	73
7.3. Badania modelowe na stanowisku laboratoryjnym w symulowanych warunkach pracy i zmiennych warunkach środowiskowych	83
8. Badania stanowiskowe aktywnego systemu balansowania BMS dla wybranej maszyny górniczej (ciągnika) PCA-1.....	88
9. Badania przydatności baterii litowej z aktywnym BMS w rzeczywistych warunkach pracy wybranej maszyny górniczej	97
9.1. Analiza uzyskanych wyników badań	107
10. Wnioski szczegółowe	108
11. Wnioski końcowe i podsumowanie	114
Wykaz najczęściej stosowanych oznaczeń i skrótów	116
Literatura	117
Załącznik I	121
Załącznik II	133
Streszczenie.....	151
Abstract.....	152

1. Wstęp

Zakłady górnicze oferują miejsca pracy, w których mogą występować, podobnie jak w innych zakładach, ogólne zagrożenia. W kopalniach jednak, a szczególnie w kopalniach głębinowych występują dodatkowo tzw. zagrożenia górnicze, wynikające z technicznej działalności człowieka w określonych warunkach geologiczno-górnictwa. Występowanie dodatkowych zagrożeń górniczych wynika już z samej specyfiki pokładu lub złoża, które w kopalniach węgla charakteryzowane jest przez nachylenie, grubość oraz sposób zalegania, warunki hydrogeologiczne, rodzaj skał stropowych i spągowych, zaburzenia tektoniczne oraz gazowość, jak również obecność w złożu pierwiastków promieniotwórczych oraz innych toksycznych [1].

Wprowadzenie do górnictwa maszyn o napędzie spalinowym polepszyło wprawdzie warunki ekonomiczne, ale pociągnęło za sobą szereg problemów związanych przede wszystkim z zanieczyszczeniem atmosfery kopalnianej. Składniki gazów spalinowych mają bowiem znaczący wpływ na zanieczyszczenie wyrobisk górniczych. Obecność toksycznych składników w spalinach silników wysokoprężnych uwarunkowana jest szeregiem czynników konstrukcyjnych i regulacyjnych, rodzajem stosowanego paliwa, przebiegiem procesu spalania, warunkami pracy oraz stanem technicznym eksploatowanych maszyn [2-3].

Rozwój górnictwa, a przede wszystkim eksploatacja coraz głębszych pokładów, wymusza ograniczanie, a w skrajnych przypadkach całkowite wyeliminowanie stosowania silników spalinowych z pracy w tych rejonach. Jest to spowodowane głównie zwiększeniem się wagi problemów związanych z efektywnym przewietrzaniem wyrobisk przez istniejące systemy wentylacyjne. Dodatkowo, udostępnianie coraz głębszych pokładów, w dużej części kopalń, oprócz zwiększenia ilości pyłu węglowego powoduje wzrost zagrożenia metanowego.

Stąd rosnące zapotrzebowanie na napędy elektryczne, które w kopalniach wymagają dostępności odpowiednich źródeł energii elektrycznej do ich zasilania. Źródła te muszą być bezpieczne w pracy (szczególnie w środowisku zagrożonym pożarem i/lub wybuchem) i nie stwarzać nadmiernych problemów zarówno w zakresie obsługi, jak i eksploatacji.

W podziemnych wyrobiskach górniczych przewóz ludzi, a także transport materiałów i urobku opiera się głównie na wykorzystaniu lokomotyw spągowych oraz ciągników podwieszonych. Spośród lokomotyw wyróżnia się, ze względu na sposób zasilania, dwa rodzaje lokomotyw górniczych:

- a) spalinowe – stanowiące obecnie większość taboru wyposażenia kopalń,
- b) trakcyjne – poruszające się w głównych chodnikach kopalnianych.

Jeśli chodzi zaś o ciągniki transportowe podwieszane, to można tutaj wyróżnić:

- a) spalinowe – stanowiące znaczącą większość ciągników podwieszonych,
- b) elektryczne – zasilane z zewnątrz za pośrednictwem kabla wleczonego,
- c) akumulatorowe – rzadko jak dotychczas stosowane.

Z powodu problemów związanych z efektywnym przewietrzaniem wyrobisk podziemnych, aktualne tendencje wskazują jednoznacznie na konieczność ograniczenia stosowania maszyn spalinowych na korzyść napędów elektrycznych. Obecnie więc, zwłaszcza w najgłębszych pokładach, podczas drążenia przodków, coraz rzadziej wykorzystuje się napędy spalinowe, a wydobycie urobku oraz transport materiału opiera się przede wszystkim na wykorzystaniu maszyn elektrycznych. Górnicze maszyny transportowe zasilane energią elektryczną posiadają jednak ograniczony zasięg stosowania wynikający z ograniczonej pojemności akumulatorów – w przypadku maszyn akumulatorowych, prowadzenia traktacji pod ziemią – w przypadku lokomotyw trakcyjnych oraz z długości kabla zasilającego – w przypadku ciągnika podwieszonego elektrycznego. Stosowanie coraz to dłuższych kabli zasilających nie wydaje się być rozwiązaniem docelowym z uwagi na związany z tym wzrost spadku napięcia oraz możliwości uszkodzenia mechanicznego. Rozwiązaniami przyszłościowymi są zatem maszyny akumulatorowe i maszyny zasilane z traktacji elektrycznej. W celu więc efektywniejszego wykorzystania tego typu maszyn należy przede wszystkim dążyć do zwiększenia sprawności lokomotyw i ciągników z napędem elektrycznym. Osiągnięcie powyższego celu, może odbywać się w dwojaki sposób. Poprzez poprawę sprawności układu zasilająco-sterującego, i/lub poprzez odpowiednią modyfikację układu napędowego. Dotychczasowe układy zasilania lokomotyw i ciągników akumulatorowych wykorzystują baterie kwasowo-ołowiowe, które posiadają jednak duże gabaryty oraz długi czas ładowania. Rozwój w dziedzinie ogniw wtórnych umożliwia wykorzystanie baterii z grupy litowej posiadających lepsze własności elektryczne. Są one jednak dużo droższe a ponadto mogą stwarzać zagrożenia podczas eksploatacji. Wymagają więc kontroli pracy oraz stosowania odpowiednich zabezpieczeń w celu dopuszczenia do użytku w warunkach istniejących kopalnianych zagrożeń naturalnych, w tym zagrożenia metanowego, temperaturowego, wodnego i pożarowego.

W związku z prowadzeniem eksploatacji, na coraz niższych głębokościach (przy wzrastającym stopniu geotermicznym górotworu, gdzie temperatura pierwotna skał przekracza temperaturę 40°C) eksploatacja staje się coraz bardziej utrudniona, a w granicznych przypadkach wprost niemożliwa.

Podwyższona temperatura środowiska ujemnie bowiem wpływa nie tylko na bezpieczeństwo pracy oraz wydajność załóg górniczych, ale również przyczynia się do podwyższenia awaryjności zainstalowanych maszyn i urządzeń elektrycznych oraz układów autonomicznego ich zasilania, a w szczególności tych, w których użyto akumulatorów litowo-jonowych. Zabezpieczenie więc przed uszkodzeniem (zwłaszcza w przestrzeniach zagrożonych wybuchem metanu lub/i pyłu węglowego), tych maszyn i urządzeń górniczych, w których jako źródło zasilania proponuje się wykorzystanie tego typu akumulatorów jest kluczowym problemem.

Oczywiście ważnym jest również zapewnienie odpowiednio wysokiej sprawności elektrycznej całego układu, tak aby zminimalizować ewentualne przestoje zasilanego urządzenia. Pożądanym jest zatem, aby zastosowana do zasilania bateria działała jak najdłużej na jednym ładowaniu/doładowaniu. Zmniejsza to ilość i czas przerw w pracy zasilanego urządzenia, niezbędnych do doładowania baterii a tym samym zwiększa efektywność pracy zasilanego urządzenia i całego procesu produkcyjnego. Poza tym, w przypadku kopalnianych urządzeń elektrycznych podwieszanych (zasilanych z baterii akumulatorów) niewielkie rozmiary i waga źródła energii elektrycznej mają istotne znaczenie.

Znaczący rozwój technologiczny akumulatorowych źródeł energii elektrycznej umożliwił wykorzystanie, do zasilania urządzeń górniczych, dostępnych na rynku akumulatorów z grupy litowej. Jak już nadmieniono są one jak dotychczas znacznie droższe od tradycyjnych akumulatorów ołowiowych, ale wykazują przede wszystkim znacznie lepszą wydajność elektryczną. Muszą być jednak odpowiednio zarządzane i chronione, tak aby mogły być z powodzeniem stosowane w uciążliwym środowisku górniczym (zagrożenie metanem, pyłem węglowym, temperaturą, wodą i/lub pożarem). Z uwagi na fakt, że wydobywanie podziemne na świecie odbywa się na coraz większych głębokościach przy temperaturach przekraczających 40°C to obniżone jest bezpieczeństwo pracy i w efekcie zwiększona awaryjność pracujących maszyn i urządzeń. Jest to istotnym również zagrożeniem dla wszystkich autonomicznych akumulatorowych źródeł zasilających niezależnie od ich rodzaju. W przypadku baterii litowych kluczowym problemem jest zapobieżenie awariom wynikającym w szczególności z rozkładu elektrolitu i związanemu z tym faktem wzrostem ciśnienia gazu wewnątrz ogniwa/ogniów. W wyniku bowiem takiej sytuacji może dojść do zapłonu uszkodzonego ogniwa i jego wybuchu. Bezpieczną eksploatację baterii litowych należy więc prowadzić w zakresie zmian tak napięcia, prądu jak i temperatury określonych przez producenta. Aby więc baterie litowe pracowały jak najdłużej i jak

najbezpieczniej, powinny być one wyposażone w odpowiednie elektroniczne moduły nadzoru znane jako Systemy Zarządzania Baterią (BMS Battery Management System) [4]. Zadaniem modułów BMS jest kontrolowanie i odpowiednie równoważenie baterii zastosowanych ogniw tak aby zapobiec ich uszkodzeniu się wskutek przeładowania, nadmiernego rozładowania i/lub przegrzania [5]. Należy w tym miejscu podkreślić, że baterie litowe są przede wszystkim, bardzo wrażliwe na pełne i/lub tzw. głębokie rozładowanie. Pozostawione w takim stanie przez długi czas mogą ulec nieodwracalnemu uszkodzeniu. Jeśli bowiem napięcie spadnie poniżej minimalnej wartości $U_{\min}$ podanej przez producenta, uszkodzeniu ulega struktura krystaliczna ogniwa. Dalsze ładowanie staje się niemożliwe [6]. Zadaniem systemu BMS jest zatem kontrolowanie on-line parametrów każdego z zastosowanych w baterii ogniw, co w przypadku przekroczenia określonego progu (napięcie, prąd, temperatura) powinno skutkować alarmowaniem i/lub odłączeniem akumulatora [7-8]. BMS odpowiada za prawidłowe zbilansowanie energii ogniw zwiększając w efekcie wydajność całej baterii i jej żywotność [9]. Konieczność równoważenia (balansowania) wynika z istniejących różnic w wartościach rzeczywistych albo ładunku, pojemności i/lub rezystancji poszczególnych ogniw akumulatora. Różnice te wynikają z tolerancji produkcyjnych i warunków pracy ogniw tego samego typu i wykazują tendencję do zwiększania się podczas pracy. Należy podkreślić, że w wyniku zmienności wartości pojemności w czasie, „słabsze” ogniwa ulegają przeciążeniu podczas ładowania. Może to doprowadzić do awarii danego ogniwa i w efekcie do uszkodzenia się całego akumulatora. Jeśli bowiem choć jedno ogniwo różni się parametrami od pozostałych, wykazując np. mniejszą pojemność, to odpowiednio zmniejsza się również pojemność całkowita baterii-akumulatora [10].

Mając na uwadze powyższe podjęto próbę dokonania oceny i wyjaśnienia wpływu zagrożeń górniczych na trwałość i efektywność pracy baterii litowych w przypadku ich wykorzystania w układach zasilania wybranych maszyn górniczych. W tym celu przeprowadzono kompleksowe badania tak modelowe (na stanowisku laboratoryjnym w symulowanych warunkach pracy maszyny i warunkach środowiskowych), jak i w warunkach rzeczywistych ze specjalnie opracowanymi w tym celu aktywnymi układami balansowania. Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów poprzedzonych odpowiednimi rozważaniami i analizami sformułowano odpowiednie wnioski i zalecenia praktyczne odnośnie do efektywnego i bezpiecznego wykorzystania baterii ogniw litowych z układami balansowania (BMS) i odzyskiem energii w przemyśle węglowym.

2. Akumulatory i ich podstawowe parametry użytkowe

W technice bardzo rozpowszechnionymi źródłami prądu są ogniwa elektrochemiczne, w których w wyniku zachodzących (w nich reakcji chemicznych) powstaje energia elektryczna. Rozróżnia się tutaj ogniwa pierwotne (nieładowalne) i wtórne (ładowalne). W ogniwach pierwotnych zachodzi nieodwracalna reakcja chemiczna, w wyniku której jest wytwarzana energia elektryczna. Ogniwa wtórne zaś umożliwiają magazynowanie energii elektrycznej dostarczanej z innych źródeł prądu, podczas procesu ładowania. Akumulatorami nazywa się zatem wtórne ogniwa galwaniczne, które mogą być wielokrotnie użytkowane i ładowane prądem elektrycznym. Wszystkie rodzaje akumulatorów elektrycznych gromadzą zatem a następnie oddają/uwalniają energię elektryczną dzięki odwracalnym reakcjom zachodzącym w elektrolicie oraz na styku elektrolitu i elektrod. Wymaganą wartość napięcia zasilania lub odpowiednią pojemność akumulatora zyskuje się poprzez szeregowe i/lub równoległe łączenie ogniw. W zależności od składu elektrolitu i budowy elektrod rozróżnia się różnego rodzaju akumulatory, w tym akumulatory z grupy litowych [11-12].

Do podstawowych parametrów użytkowych charakteryzujących ogniwa elektrochemiczne należą:

Sila elektromotoryczna [V] – to różnica potencjałów pomiędzy elektrodami ogniwa odwracalnego, występująca wówczas, gdy stan równowagi obu elektrod zostaje zachowany. Sytuacja taka ma miejsce, gdy ogniwo pozbawione jest obciążenia. Siłę elektromotoryczną ogniwa *SEM* definiuje się jako:

$$SEM = \frac{\Delta G}{q} \quad (2.1)$$

gdzie ΔG to zmiana entalpii swobodnej sumarycznej reakcji zachodzącej w ogniwie, zaś q to przepływający ładunek.

Pojemność ogniwa Q [Ah] – jest to ilość ładunku elektrycznego, którą można uzyskać z naładowanego ogniwa. Dla ogniw litowych [16] można ją zdefiniować za pomocą wzoru:

$$Q = \frac{F \cdot m \cdot \Delta x}{3600 \cdot M} \quad (2.2)$$

gdzie F – stała Faradaya; Δx - zakres zmienności zawartości interkalowanego litu, zaś m i M to odpowiednio masa i masa molowa materiału katodowego.

Zgromadzona energia [Wh] – to iloczyn pojemności Q i siły elektromotorycznej E ogniwa (przy założeniu, że wartość E jest stała w całym zakresie pracy ogniwa).

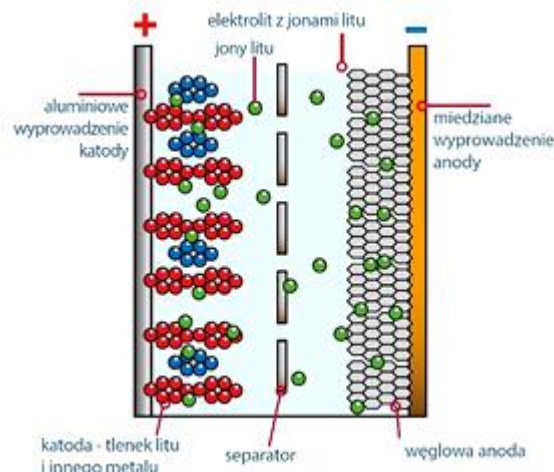
Wolumetryczna gęstość zgromadzonej energii [Wh/dm³] oraz **grawimetryczna gęstość zgromadzonej energii** [Wh/kg] – są to wartości energii zgromadzonej w ogniwie, ale odniesione odpowiednio do jednostki objętości lub masy ogniwa.

2.1. Ogniwa litowe – budowa, zasada działania i podstawowe parametry

Już na początku XX wieku zauważono duży potencjał litu jako materiału ogniw elektrycznych. Jest to metal o małej gęstości, dużym potencjale elektrochemicznym i wysokiej wartości stosunku energii do masy. Amerykański fizyk chemik George Newton Lewis rozpoczął eksperymenty z litowymi bateriami już w roku 1912, lecz dopiero w 1970 roku baterie litowe pojawiły się na rynku. Pierwszy ważny skok w rozwoju ogniw litowych nastąpił w roku 1979 w którym to roku Profesor John Goodenough oraz Koichi Mizushima na Uniwersytecie Oksfordzkim opracowali nowy rodzaj baterii litowej, w której lit mógł przemieszczać się z jednej elektrody do drugiej w postaci jonów. Rozwiązanie to jest bazą dla aktualnych konstrukcji baterii litowych oferowanych na rynku.

Pierwszej komercyjnej baterii litowej doczekano się jednak dopiero w 1991 roku. Wprowadziła ją firma Sony w swoich kamerach, a kolejne firmy podążyły śladami japońskiego giganta [13]. Szybko dostrzeżono wielką przewagę technologii litowej nad dominującą wówczas nikłowo-kadmową. Atutem była nie tylko wysoka gęstość energii, pozwalająca na zgromadzenie dwukrotnie większego ładunku w baterii, ale i wysoka wartość napięcia ogniwa na poziomie 3,6 V (ogniwa nikłowo-kadmowe uzyskiwały napięcie 1,2 V, więc potrzeba było by trzech, by uzyskać podobną wartość napięcia). Dodatkowe zalety, „które popchnęły baterie litowe do przodu” to brak efektu pamięci, niska szkodliwość dla środowiska oraz dłuższy czas samorozładowania.

Ogniwa litowe typu $LiFePO_4$ (litowo-żelazowo-fosforanowe) są jednymi z licznych rodzajów odwracalnych ogniw elektrochemicznych [14-15].



Rys. 2.1. Ilustracja mechanizmu działania odwracalnego ogniwa litowego.
Interkalacja i deinterkalacja materiału katodowego i anodowego
w trakcie pracy ogniwa

Zasada działania takiego ogniwa litowego (rys. 2.1) opiera się na zjawisku interkalacji/deinterkalacji litu, czyli wprowadzania lub wyprowadzania jonów litu do lub ze struktury materiału stanowiącego katodę; związku metalu przejściowego typu LiMaXb (M – metal, X – tlen, siarka,...). Komplementarny zaś proces, odpowiednio do deinterkalacji lub interkalacji, zachodzi na anodzie (zwykle jest to grafit). Podczas rozładowania, gdy jony litu samorzutnie wędrują poprzez elektrolit z interkalowanej litem grafitowej anody do materiału katodowego (po dotarciu do materiału katodowego) lokują się w dostępnych miejscach w jego strukturze. Równocześnie w elektrycznym obwodzie zewnętrznym płynie prąd elektronowy, kompensujący prąd jonowy w elektrolicie. Prąd ten służy do wykonywania pracy zewnętrznej. W trakcie tego procesu zarówno jony litu, jak i elektrony muszą być przyjęte i rozproszone w strukturze materiału katodowego z odpowiednio dużą szybkością, tak by możliwym było uzyskiwanie prądów o natężeniach potrzebnych do zasilania urządzeń. Dlatego też gęstość prądu pobieranego z ogniwa zależy przede wszystkim, od wartości współczynnika dyfuzji chemicznej litu $\tilde{D}_{\text{Li}}$ w materiale katodowym, który ilościowo opisuje sprzężoną dyfuzję elektronów i jonów litu w materiale katodowym (tzw. dyfuzja ambipolarna). Proces odwrotny, czyli deinterkalację materiału katodowego i powtórna interkalację grafitowej anody trzeba wymusić przykładając zewnętrzne źródło napięcia (ładowanie). Również i w tym przypadku wartość współczynnika dyfuzji chemicznej litu $\tilde{D}_{\text{Li}}$ w materiale katodowym w największym stopniu określa maksymalną prędkość tego procesu.

2.1.1. Zjawisko interkalacji

Interkalacja to proces odwracalnego wbudowywania w strukturę ciała stałego jonów, atomów lub cząsteczek innej substancji, przebiegający bez powodowania zasadniczych zmian w strukturze krystalicznej interkalowanego materiału. Proces odwrrotny nosi nazwę deinterkalacji. Proces interkalacji możliwy jest do uzyskania tylko w przypadku stosunkowo niewielkiej grupy materiałów – najczęściej udaje się interkalować materiały o strukturze warstwowej a wprowadzane substancje to zwykle jony metali alkalicznych lub wodoru. Zjawisko interkalacji znalazło powszechne zastosowanie jako mikroskopowy mechanizm działania odwracalnych ogniw litowych typu *Li-ion batteries*.

Wykorzystany w ogniwach litowych mechanizm interkalacji polega na odwracalnym wbudowywaniu jonów litu (jeden lub więcej moli litu na mol związku) do struktury związków metali przejściowych (stanowiących materiał katodowy) i grafitu (będącego zwykle materiałem anodowym) bez zasadniczej zmiany parametrów struktur krystalicznych tych substancji. Podstawowe elementy komórki elementarnej interkalowanych materiałów pozostają niezmienione z wyjątkiem niewielkich, odwracalnych dystorsji struktury materiału.

Podstawowym czynnikiem determinującym parametry pracy ogniwa są zastosowane do jego konstrukcji materiały. Materiał katodowy, anodowy oraz elektrolit muszą więc spełniać szereg odpowiednich warunków.

2.1.2. Materiał elektrod i rodzaj stosowanego elektrolitu

Pierwotnie, niejako naturalnym materiałem anodowym w ogniwach litowych był lit metaliczny. Baterie takie zostały nawet wprowadzone na rynek, jednak w czasie cyklu ładowania narastały na litowej anodzie dendryty litu, co prowadziło do zwarcia wewnętrznego ogniwa, wzrostu temperatury i wybuchu. Obecnie stosowanym materiałem anodowym jest grafit, który również ma zdolność interkalowania jonów litu. Takie rozwiązanie zostało wprowadzone przez firmę Sony w roku 1989 pod nazwą „*Li-ion battery*”. Grafit jako materiał anodowy zapewnia bezpieczeństwo użytkowania baterii przy niewielkim spadku napięcia w porównaniu do zastosowania litu metalicznego (zbliżony potencjał). Grafit jest materiałem tanim, łatwo dostępnym, nietoksycznym, a ponad to ma mały ciężar właściwy. Podstawową wadą zastosowania grafitu jest jego duża objętość molowa, przez co znacznie spada wolumetryczna gęstość energii zgromadzonej w baterii. Stanowi to przeszkodę minimalizacji rozmiarów ogniw. Chociaż wciąż trwają prace nad wykorzystaniem innego typu materiału anodowego zdolnego do wbudowywania jonów litu w swoją strukturę (nanorurki węglowe, związki międzymetaliczne) to jednak ze względu na szereg zalet uważa się, że grafit pozostanie materiałem anodowym dla przyszłych generacji odwracalnych ogniw litowych [16].

Elektrolit powinien wykazywać się możliwie wysokim przewodnictwem jonowym przy zupełnym braku przewodnictwa elektronowego. Ponadto musi wykazywać bierność chemiczną tak w stosunku do materiału katody, jak i anody (stabilność w tzw. oknie elektrochemicznym). Obecnie stosuje się niewodne roztwory soli litu w rozpuszczalniku organicznym. Konieczność stosowania rozpuszczalników niewodnych (lub częściej ich mieszanin) wynika głównie z dużej reaktywności litu. Najpowszechniej stosowanymi rozpuszczalnikami są: węglan etylenu, węglan dimetylu i węglan dietylu. Jako soli używa się związków o słabo kompleksujących anionach. Najczęściej stosuje się LiPF_6 , LiBF_4 , LiClO_4 . Istotnym problemem związanym z zastosowaniem rozpuszczalników organicznych są procesy zachodzące na granicy faz elektrolit – materiał katodowy, począwszy od reakcji chemicznych (reakcje kwas-zasada, polimeryzacja) na przemianach fazowych skończywszy. Procesy te prowadzą do wytworzenia cienkiego filmu (warstewki) na granicy, który pogarsza transport jonów litu, a przez to niekorzystnie wpływa na pracę baterii. Aby uniknąć pracy z rozpuszczalnikami organicznymi i stosowania ciekłych elektrolitów trwają prace nad stosowaniem elektrolitów polimerowych (komercyjne ogniwa *Li-polymer*) oraz elektrolitów stałych.

Parametry użytkowe ogniwa litowego w największym stopniu określa charakterystyka materiału katodowego. Pomimo, że sama koncepcja działania ogniwa litowego jest prosta, to jednak by związek metalu przejściowego mógł być stosowany jako materiał katodowy powinien spełniać szereg kryteriów:

- Związek interkalowany $\text{Li}_x\text{M}_a\text{X}_b$ powinien charakteryzować się wysokim potencjałem chemicznym względem litu ($\mu_{\text{Li}(c)}$) zapewniającym wysoką wartość napięcia ogniwa. W związku z tym metal przejściowy M w tym związku powinien posiadać wysoki stopień utlenienia.
- Związek $\text{Li}_x\text{M}_a\text{X}_b$ powinien stwarzać możliwość odwracalnego wbudowania dużej ilości litu (x), by zmaksymalizować pojemność ogniwa. Cecha ta zależy od ilości dostępnych miejsc dla jonów litu w strukturze materiału oraz od ilości stopni walencyjnych metalu M jakie może przyjąć. Kombinacja wysokiej pojemności ładunkowej oraz napięcia ogniwa określają wysoką gęstość zgromadzonej energii, która generalnie jest iloczynem tych wielkości.
- Proces interkalacji/deinterkalacji litu musi być odwracalny, co związane jest z niewielkimi zmianami w strukturze związku metalu przejściowego w całym zakresie zawartości litu (x) w celu zapewnienia odpowiednio długiego czasu pracy ogniwa. Oznacza to stabilność struktury związku $\text{Li}_x\text{M}_a\text{X}_b$ bez rozrywania wiązań M-X.
- Materiał elektrodowy musi charakteryzować się dobrym mieszanym przewodnictwem jonowo-elektronowym. Wysokie bowiem przewodnictwo

elektronowe σ_e i jonowe σ_{Li} minimalizuje straty polaryzacyjne podczas procesów ładowania i rozładowania, co umożliwia osiągnięcie wysokiej sprawności ogniwa. Cecha ta zależy między innymi od struktury krystalograficznej, konfiguracji miejsc dostępnych dla jonów litu oraz natury i konfiguracji jonów M^{n+} .

- Konieczna jest stabilność chemiczna związków elektrodowych. Nie mogą one reagować z elektrolitem w całym zakresie zawartości litu. W szczególności energia reakcji redox katody nie może znaleźć się w obszarze tzw. okna elektrochemicznego elektrolitu zarówno podczas ładowania, jak i rozładowywania ogniwa.
- Z praktycznego punktu widzenia zarówno materiał katody, anody, jak i elektrolit nie powinny być drogie, trudne w syntezie, toksyczne i/lub uciążliwe dla środowiska.

2.1.3. Zagrożenia związane z eksploatacją ogniw litowych

Uszkodzenia akumulatorów litowych są niepożądane nie tylko dlatego, że w ich wyniku odbiornik zostaje odcięty od zasilania. W skrajnych przypadkach mogą one również stanowić zagrożenie dla życia oraz zdrowia ich użytkowników [17].

Głównymi czynnikami zagrożeniowymi wynikającymi z niewłaściwej eksploatacji ogniw litowych są:

- przekroczenie dopuszczalnej temperatury pracy i przechowywania,
- przeładowanie,
- nadmierne rozładowanie,
- urazy mechaniczne.

Wpływ wymienionych wyżej czynników może być różny w zależności od warunków eksploatacyjnych maszyn i urządzeń górniczych zasilanych z baterii akumulatorowych zbudowanych z ogniw litowych. W zasadzie wszystkie z nich mogą w odpowiednich warunkach przyczynić się do powiększania ujemnych skutków możliwych zagrożeń, które mogą doprowadzić do zapłonu a w skrajnych przypadkach wybuchu pojedynczego ogniwa litowego, a także doprowadzić w ten sposób do uszkodzenia pozostałych ogniw baterii akumulatorowej, co w rezultacie może doprowadzić do eskalacji zagrożenia.

2.1.3.1. Temperatura pracy i przechowywania a trwałość ogniwa litowego

Trwałość wyraża się liczbą cykli ładowania/rozładowania, a jako koniec życia akumulatora przyjmuje się zwykle spadek jego pojemności do 80% wartości nominalnej. Zależy ona od szeregu czynników, między innymi od temperatury pracy i temperatury przechowywania oraz przebiegu procesu ładowania. W celu więc zwiększenia trwałości zaleca się przechowywanie nieużywanych akumulatorów litowych w stosunkowo niskiej temperaturze (około 6°C) i co dość istotne, najlepiej naładowanych tylko do 40% pojemności.

Konkretne parametry graniczne temperatury pracy zależą od technologii wykonania danego wariantu ogniwa.

Zgodnie z zasadami rządzącymi reakcjami chemicznymi wydajność prądowa, określająca maksymalne natężenie prądu, który można pobierać z akumulatora, i efektywny ładunek ogniwa litowego maleje wraz ze spadkiem temperatury. Używanie więc ogniwa poniżej temperatury -20°C jest wprawdzie możliwe, jednak jego właściwości energetyczne będą bardzo ograniczone, a trwałość naruszana. W warunkach zimowych uzasadniona wydaje się zatem koncepcja stosowania odpowiedniego podgrzewacza, który poprawi warunki pracy ogniw litowych, z których zbudowany jest akumulator. Zużywając jednak energię obniży się czas trwania użytkowania.

Temperatury powyżej optymalnej nie są również zalecane ze względów bezpieczeństwa. Jest to szczególnie istotne w sytuacji, kiedy akumulator składa się z setek ogniw, a ich chłodzenie jest ograniczone i niejednakowe. Już bowiem nieco powyżej temperatury granicznej danego typu ogniwa następuje znaczące odkładanie się metalicznego litu. Jeżeli więc temperatura wzrośnie znacznie powyżej wartości granicznej to może zostać naruszona struktura warstwy pasywnej rozdzielającej elektrodę ujemną i elektrolit. Prowadzi to do silnie egzotermicznej reakcji grafitu z elektrolitem i może doprowadzić do wzrostu ciśnienia i puchnięcia ogniwa lub zrzutu gazu przez zawór bezpieczeństwa. Jeśli zatem w ogniwie znajdzie się wolny tlen, np. z wywołanej ciepłem dekompozycji matrycy katodowej, to może nastąpić zapłon lub/i wybuch uszkodzonego ogniwa.

W celu wyrównywania i obniżania temperatury ogniw w baterii możliwe jest zastosowanie układu wymuszonego chłodzenia cieczą lub powietrzem. Również w procesie ładowania akumulatora należy uwzględnić wpływ temperatury. Wraz bowiem ze spadkiem jej wartości maleje dopuszczalne napięcie, powyżej którego ryzyko formowania się metalicznego litu na anodzie jest wysokie. Producenci ogniw litowych nie zalecają ładowania w temperaturze poniżej 0°C lub nakazują ładowanie niskimi prądami rzędu C/10, co wydłuża proces ładowania.

2.1.3.2. Przyczyny uszkodzeń ogniw litowych

Akumulatory, niezależnie od ich rodzaju, poddawane są ścisłej kontroli już na początkowym etapie produkcji. Dzięki temu wybrakowane półprodukty mogą zostać odpowiednio wcześniej wyłączone z dalszego przetwarzania. Przyczyny ich gorszej jakości bywają różne. Są to na przykład awarie maszyn lub ich błędne ustawienia. Im większa liczba produktów nie zostanie ukończona, tym niestety mniejsza jest wydajność produkcji, a jej koszty większe.

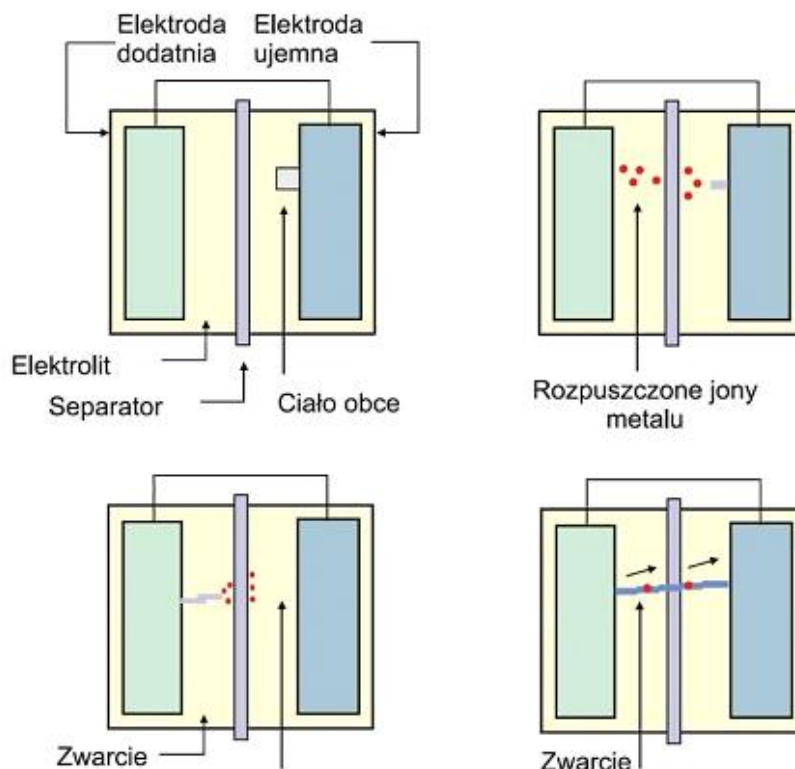
Wiele problemów w funkcjonowaniu akumulatorów ujawnia się tuż po ich wyprodukowaniu lub zaraz po rozpoczęciu ich użytkowania. Awaryjność tych urządzeń jest bowiem zwykle największa na początku oraz pod koniec ich użytkowania (rys. 2.2). W międzyczasie wartość tego wskaźnika utrzymuje się na względnie stałym poziomie.



Rys. 2.2. Najwięcej awarii występuje na początku oraz pod koniec użytkowania akumulatora

Główną przyczyną wczesnie ujawniających się awarii akumulatorów są, przede wszystkim, błędy w ich konstrukcji. Są one powodowane przez błędy w projekcie lub przeoczenie i zamontowanie w urządzeniu uszkodzonych lub wybrakowanych podzespołów. Te ostatnie mogą mieć na przykład niewłaściwe wymiary. Jeżeli nie są wykonane z odpowiedniego materiału, możliwe, że będą z kolei mniej wytrzymałe mechanicznie oraz mniej odporne na korozję. Problemem są również podzespoły niestarannie wykończone. Ostre krawędzie mogą na przykład uszkodzić separatory elektrod, powodując wewnętrzne zwarcie akumulatora.

Poważny problem stanowią również zanieczyszczenia wprowadzone w czasie produkcji do wnętrza zasobnika energii, które wchodzi w reakcję z materiałami oraz chemikaliami użytymi do budowy akumulatora (rys. 2.3). Nowe związki powstałe w wyniku różnych reakcji chemicznych dyfundują w elektrolicie, osiadając ostatecznie na elektrodach. Niektóre reakcje mogą ponadto zachodzić bardzo gwałtownie. Powoduje to wzrost ciśnienia wewnętrznego akumulatora. Wcześniej ujawniają się również takie problemy, jak słabość połączeń konstrukcji zasobnika oraz nieszczelności w jego obudowie. Spowodowane nimi wycieki elektrolitu oraz wnikanie wilgoci do wnętrza urządzenia znajdują odzwierciedlenie w jego niższej wydajności.



Rys. 2.3. Ilustracja wpływu zanieczyszczeń wewnątrz akumulatora mogących spowodować zwarcie elektrod

Z różnych przyczyn każdy akumulator, w tym litowy, może się też przedwcześnie zużyć. Jest to powodowane głównie stopniową zmianą właściwości materiałów aktywnych. Inne przyczyny to m.in. postępujące niszczenie materiałów, z których wykonano separatory oraz uszczelnienia urządzenia. Akumulator zużywa się szybciej również na skutek

samorozładowania, czyli samoistnego wyładowania zasobnika, który nie jest połączony z odbiornikiem energii elektrycznej.

Wszystkie akumulatory są budowane w taki sposób, aby energia chemiczna w nich zgromadzona była stopniowo uwalniana w postaci energii elektrycznej dostarczanej odbiornikom. Niekontrolowane i gwałtowne jej wyzwolenie powoduje wzrost temperatury, który może doprowadzić do pożaru lub wybuchu. Odłamki z takiej eksplozji mogą pokaleczyć ludzi znajdujących się w najbliższym otoczeniu lub uszkodzić sąsiednie urządzenia. W czasie pożaru zniszczeniu może ulec również zasilany odbiornik. Podczas takich zdarzeń do otoczenia wyciekają również toksyczne i powodujące korozję ciecze, wydzielają się także różnego rodzaju trujące gazy.

Akumulatory ulegają awarii albo z powodu defektów w ich konstrukcji, albo w wyniku ich niewłaściwego używania. Te pierwsze to na przykład wewnętrzne zwarcia elektrod. W czasie korzystania z tych urządzeń dojść może też do szeregu zdarzeń spowodowanych celowym lub nieumyślnym działaniem ich użytkowników. Przykładem jest zwarcie zacisków, upuszczenie, zgniecenie, przedziurawienie lub uszkodzenie jego obudowy w inny sposób. Niebezpieczne jest też wystawianie tego urządzenia na działanie skrajnych czynników środowiskowych, na przykład wysokich temperatur, wibracji lub ognia oraz jego rozkładanie na części. Przeładowanie akumulatora lub jego nadmierne rozładowanie, używanie jednocześnie starych oraz nowych baterii lub zasobników różniących się pojemnością również nie jest zalecane.

Częstym błędem jest rozładowanie ogniwa poniżej dopuszczalnego napięcia podanego przez producenta. Rozładowanie ogniwa poniżej minimalnego napięcia nie stanowi dla użytkownika tak dużego zagrożenia jak przeładowanie czy zwarcie, o ile nie będziemy dalej eksploatować akumulatora. Najczęściej da się taki akumulator naprawić ładując go bardzo małym prądem, jednak nadmierne rozładowanie może doprowadzić do pogorszenia jego sprawności, a w skrajnych przypadkach może dojść do utraty lub zmniejszenia pojemności.

O wiele bardziej niebezpieczne dla użytkownika jest przeładowanie poprzez przekroczenie maksymalnego napięcia określonego przez producenta. Na skutek niewielkiego przeładowania często występuje zjawisko tzw. „puchnięcia” ogniwa. Jeżeli jednak przeładowanie się zwiększy to może dojść do zapalenia się ogniwa, a w efekcie całego akumulatora. Zniszczeniu może ulec otoczenie, którym najczęściej jest zasilane urządzenie. Jednak najgroźniejszą sytuacją może być bardzo duże przeładowanie, co może doprowadzić do wybuchu.

Takie sytuacje powodowane przez ładowarkę zdarzają się rzadko, ponieważ koniec procesu ładowania jest kontrolowany przez samą ładowarkę. Jedynym powodem może być jej uszkodzenie.

2.1.3.3. Środki bezpieczeństwa i ochrony

W celu zwiększenia gęstości mocy akumulatorów ich producenci najchętniej korzystaliby z materiałów oraz związków chemicznych, które reagują ze sobą bardzo silnie. Niektóre takie połączenia niestety równocześnie stanowią większe zagrożenie w razie uszkodzenia baterii. Równocześnie akumulatory tego typu mają nieco mniejszą pojemność. Do elektrolitu z kolei dodawane są inhibitory, które mają właściwości tłumiące lub opóźniające rozprzestrzenianie się płomienia.

W przypadku ogniów dużej mocy ważne jest też zapewnienie możliwości skutecznego odprowadzania nadmiaru ciepła. Jeżeli bowiem akumulator zacznie się przegrzewać elementem, który może ulec uszkodzeniu w pierwszej kolejności jest separator. Ponieważ jest on z reguły wykonywany z tworzywa sztucznego może się zniekształcić lub stopić. W najgorszym przypadku może to doprowadzić do zwarcia elektrod. Aby temu zapobiec m.in. separatory wykonuje się m. in. ze specjalnych, bardzo sztywnych materiałów, odpornych na skrajnie wysokie temperatury lub z elastycznych tworzyw sztucznych pokrytych powłoką z proszkiem ceramicznym, która zapobiega kontaktowi między elektrodami.

Stosowane są również specjalne tworzywa sztuczne, których impedancja gwałtownie rośnie po przekroczeniu określonej wartości temperatury. W czasie topienia się takiego materiału jego pory zamykają się. Proces ten jest niestety nieodwracalny. Kiedy zwarcie elektrod już nastąpi można jedynie odłączyć akumulator izolując go od ładowarki lub obciążenia. Chociaż nie rozwiązuje to problemu to jest to powszechnie stosowanym środkiem bezpieczeństwa. W celu wykrycia takiego stanu system zarządzania baterią monitoruje napięcie jej ogniów. W razie jego gwałtownego spadku izoluje akumulator.

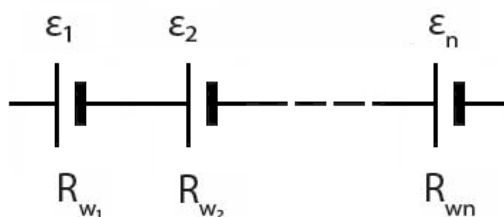
Jeżeli ogniwo litowe zaczyna się przegrzewać to wewnątrz jego obudowy szybko rośnie też ciśnienie. Może to doprowadzić do jej pęknięcia lub wybuchu. By temu zapobiec wyposaża się je w odpowietrzniki. W ogniwach litowych stosowane są również specjalne zabezpieczenia. Odłączają one prąd w razie wzrostu jego ciśnienia powyżej określonej wartości. Podstawowym zabezpieczeniem każdego akumulatora jest oczywiście odpowiednio wytrzymała obudowa.

2.1.3.4. Łączenie baterii

Połączenia baterii możemy podzielić na dwie grupy: szeregowę i równoległą.

W połączeniu szeregowym (rys. 2.4) biegun ujemny pierwszej baterii połączony jest z biegunem dodatnim drugiej baterii, natomiast biegun ujemny drugiej - z dodatnim trzeciego. itd. Kierunki siły elektromotorycznej poszczególnych źródeł prądu są wówczas zgodne i wypadkowa siła

elektromotoryczna układu, tak zwanej baterii, równa jest sumie sił poszczególnych źródeł.



Rys. 2.4. Połączenie szeregowe

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n; E = \sum E_n$$

Również oporność wewnętrzna baterii stanowi sumę oporności wewnętrznej poszczególnych źródeł prądu:

$$R_w = R_{w1} + R_{w2} + R_{w3} + \dots + R_{wn}; R_w = \sum R_{wn}$$

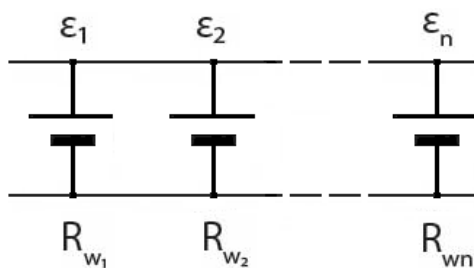
Połączenie szeregowe stosuje się w tych przypadkach, gdy chodzi o zwiększenie napięcia źródeł prądu.

W połączeniu równoległym (rys. 2.5) bieguny dodatnie wszystkich źródeł prądu, przyłącza się do jednego zacisku baterii, a ujemne - do drugiego. Siła elektromotoryczna jest w tym przypadku równa sile elektromotorycznej pojedynczego źródła prądu:

$$E = E_n$$

natomiast energia elektryczna, którą można czerpać z takiej baterii jest wprost proporcjonalna do ilości ogniw.

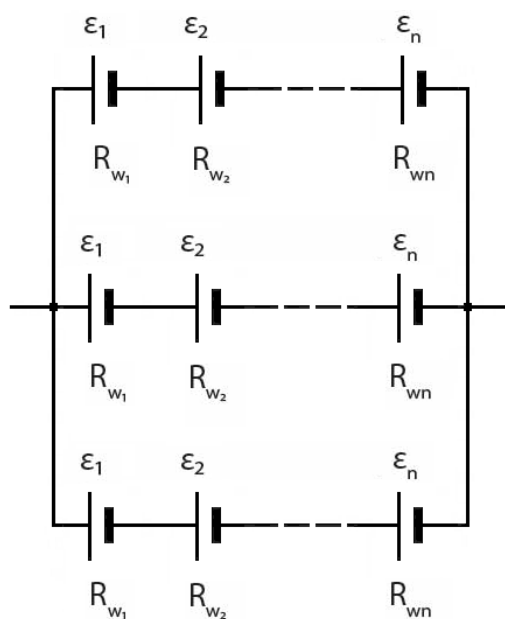
Aby uniknąć niepożądanych strat energii należy do połączeń równoległych używać ogniw o tych samych wartościach sił elektromotorycznych oraz oporności wewnętrznych.



Rys. 2.5. Połączenie równoległe

Z powyższych opisów wynika, że w tych przypadkach, gdy oporność zewnętrzna jest znacznie większa od oporności wewnętrznej, bateria połączona szeregowo umożliwia otrzymanie znacznego natężenia prądu w obwodzie; i odwrotnie w tych przypadkach, gdy stosunek oporności zewnętrznej do wewnętrznej jest niewielki, większe natężenie prądu daje połączenie równoległe, przy równoczesnym wzroście napięcia.

Równoczesne powiększenie napięcia i natężenia prądu uzyskuje się w połączeniu mieszanym (rys. 2.6), które zawiera kilka jednakowych grup źródeł prądu połączonych szeregowo, a grupy z kolei połączone są ze sobą równoległe.



Rys. 2.6. Połączenie mieszane (szeregowo-równoległe)

3. Technologia ładowania akumulatorów litowych

Ładowanie akumulatora (ogniwa) polega na dostarczeniu do niego prądu elektrycznego, w celu całkowitego odtworzenia aktywnych związków chemicznych. Realizowane jest to w dwóch etapach: przy stałej wartości prądu (ang. *constant current*, CC), kiedy napięcie ogniwa jest jeszcze niższe od wartości uznawanej za dopuszczalną w danej temperaturze oraz przy stałej wartości napięcia (ang. *constant voltage*, CV) i malejącej wartości prądu. Wykrycie, że to nastąpiło, powinno prowadzić do zakończenia procesu ładowania, aby uniknąć rozpraszania prądu i generowania ciepła. Błędne lub niewłaściwe odcięcie dopływu prądu i zakończenie ładowania może powodować wystąpienie uszkodzenia, a ogólnie przyczynia się do skrócenia czasu życia akumulatora. Przy prostszych ładowarkach zakończenie ładowania ustala się po osiągnięciu określonego wcześniej granicznego napięcia. Oczywiście prąd ładowania także nie może przekroczyć wartości dopuszczalnej w danej temperaturze podanej przez producenta ogniwa. Ładowanie ogniwa jest ważnym etapem jego eksploatacji i ma duży wpływ na jego trwałość.

Przedstawione poniżej sposoby ładowania akumulatorów litowych stosowanych w maszynach i urządzeniach są ciągle udoskonalane, dlatego nie można ich traktować jako rozwiązań docelowych dla szeroko rozumianej elektromobilności. Dynamiczny rozwój baterii będzie umożliwiał zwiększanie wartości prądów ładowania oraz wymuszał tym samym stosowanie wydajniejszych i elastyczniejszych sposobów ich eksploatacji (ładowania).

3.1. Sposoby ładowania akumulatorów litowych

Ładowanie przy stałej wartości napięcia

Wartość napięcia ładowania jest utrzymywana na stałym poziomie maksymalnym, możliwym do zastosowania dla określonego typu akumulatora. Prąd ładowania powoli zmniejsza się w miarę osiągnięcia pełnego naładowania akumulatora. Ta metoda jest jednak skuteczna dla niższych wartości napięć, ponieważ temperatura zwykle nie stanowi problemu, ale niepożądane są długie czasy trwania ładowania.

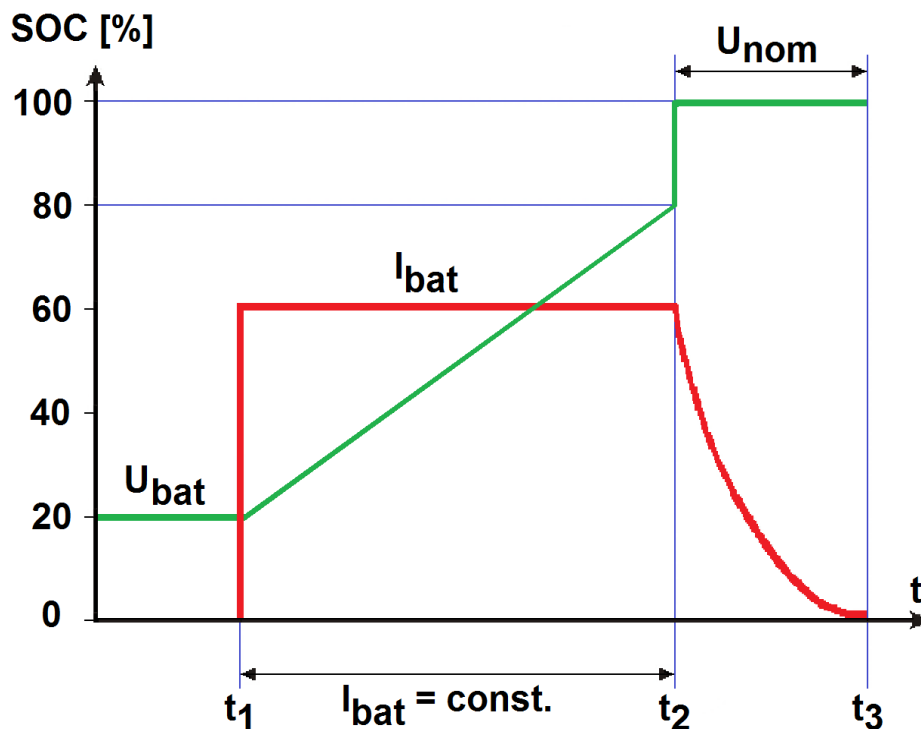
Ładowanie stałą wartością prądu

Ta metoda polega na ładowaniu akumulatora prądem o ustalonej stałej wartości. Koniecznym jest wtedy nadzorowanie czasu trwania ładowania, co wymaga użycia ładowarki lub prostownika umożliwiającego dostarczenie stałego co do wartości prądu do akumulatora, przy zmieniającej się wartości napięcia w czasie ładowania. Ta metoda nie jest zalecana przez producentów akumulatorów, ponieważ trudno jest określić ilość ładunku elektrycznego, który może być zmagazynowany w akumulatorze. Przy głębokim bowiem

rozładowaniu akumulator nie zostanie całkowicie naładowany, a przy doładowaniu zaś może dojść do jego przeładowania.

Ładowanie przy stałej wartości prądu i napięcia

Ta metoda jest powszechnym sposobem ładowania akumulatorów pojazdów elektrycznych. Ładowarka utrzymuje stałą wartość prądu, aż do chwili osiągnięcia przez akumulator określonej wartości napięcia, w którym to punkcie napięcie to jest utrzymywane na stałym poziomie. W tym samym czasie prąd nadal maleje aż do osiągnięcia pełnego naładowania akumulatora. Jest to tradycyjna metoda ładowania akumulatorów. Jest ona jednak ograniczona w przypadku konieczności szybkiego ładowania. Polaryzacja akumulatorów staje się wówczas problemem (rys. 3.1.).



Rys. 3.1. Metoda ładowania stałym prądem i stałym napięciem

Ładowanie impulsowe

Strategia ładowania impulsowego polega na wysyłaniu impulsów prądu do akumulatora w sposób optymalizujący czas ładowania ze względu na polaryzację, nagrzewanie akumulatora, stan naładowania akumulatora SOC*(*State of Charge*) i zmienną wartość impedancji akumulatora. Czas

przerwy każdego okresu impulsu pozwala jonom dyfundować poprzez materiały elektrod, zwiększając wydajność procesu.

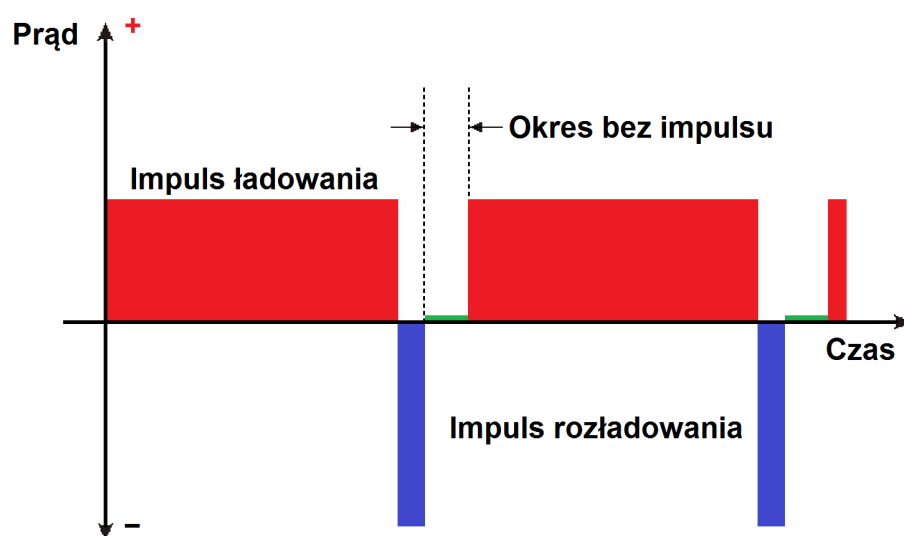
Ze względu na pojemnościowy charakter baterii jego impedancja zmienia się wraz z częstotliwością podczas ładowania, podobnie jak wartość prądu ładowania. Dobierając zatem odpowiednią częstotliwość impulsów można zminimalizować impedancję, co zmaksymalizuje wartość prądu i przyczyni się do skrócenia czasu trwania ładowania baterii. Wartości impedancji baterii różnią się w zależności od temperatury i stanu jej naładowania (SOC). Polaryzację akumulatorów litowych można uwzględnić, kontrolując współczynnik wypełnienia impulsu. Dzięki zatem zastosowaniu dynamicznego algorytmu sterowania, optymalna częstotliwość i cykl pracy mogą być stale obliczane i zmieniane, minimalizując w ten sposób czas trwania ładowania akumulatora przy uwzględnieniu jego aktualnego stanu. Jeśli współczynnik wypełnienia i częstotliwość są odpowiednio dobrane, to ładowanie impulsowe jest bardziej wydajne niż ładowanie stałym prądem i stałym napięciem. Żywotność wydłuża się nawet o 100 cykli, co w pojazdach elektrycznych ładowanych raz w tygodniu odpowiada około dwóm kalendarzowym latom wydłużonej eksploatacji [18].

Jeśli jednak częstotliwość i współczynnik wypełnienia nie zostały odpowiednio dobrane, może to poważnie pogorszyć żywotność akumulatora, jak miało to miejsce dla współczynnika wypełnienia 0,2 ze względu na duże impulsy prądowe. Technologie ładowania impulsowego muszą więc zapewnić prawidłowe parametry ładowania, tak aby zmaksymalizować żywotność baterii. W przeciwnym razie nie przyniesi to poprawy w porównaniu z tradycyjną metodą ładowania stałym prądem i stałym napięciem.

***Stan naładowania (SOC – *State of Charge*) [%]** – definiuje stan dostępnej energii w akumulatorze jako procent maksymalnej pojemności i jest na ogół obliczany wykorzystując całkowanie prądu po czasie, co określają zmiany pojemności akumulatora w funkcji czasu.

Ładowanie impulsowe z częściowym rozładowywaniem

Odmianą strategii impulsowego ładowania jest wykorzystywanie krótkotrwałych rozładowujących ujemnych impulsów o dużej amplitudzie pomiędzy dodatnimi impulsami ładowania baterii. Została ona pierwotnie opracowana w celu zwiększenia wydajności ładowania akumulatorów kwasowo-ołowiowych, natomiast obecnie jest rozszerzona na akumulatory litowo-jonowe. Ujemny impuls powoduje niewielkie rozładowanie akumulatora podczas okresu spoczynku ładowania impulsowego i zmniejsza naprężenia w ogniwie, a także pomaga zminimalizować wzrost temperatury ogniwa. Bateria może być więc ciągle doładowywana prądem o dużej wartości, który okresowo, zmieniając kierunek, depolaryzuje ogniwo i skraca czas trwania ładowania. Ta metoda może znacznie poprawić żywotność baterii (rys. 3.2).



Rys 3.2. Zasada ładowania impulsowego z ujemnymi impulsami rozładowania

4. Charakterystyka zagrożeń stosowania ogniw litowych w przemyśle węglowym

Rodzaje podstawowych zagrożeń, których nasilenie i możliwe skutki są szczególnie istotne w górnictwie oraz kryteria ich oceny przedstawione są w odpowiednich postanowieniach przepisów prawa górniczego. Oprócz powszechnie występującego zagrożenia pożarowego są to następujące zagrożenia górnicze:

- zagrożenie wodne, rozumiane jako niekontrolowalne wdarcie się wody do wyrobisk, stwarzające niebezpieczeństwo dla załogi, ruchu zakładu górniczego, złóż kopalin lub ich części,
- zagrożenie tąpnięciami, stwarzające możliwości nagłego i gwałtownego zniszczenia struktury skał z równoczesnym wyrzuceniem ich do wybranej przestrzeni,
- zagrożenie metanowe, objawiające się wydzielaniem bądź nagłym wypływem lub wyrzutem metanu ze złóż kopalin lub ich części,
- zagrożenie wyrzutami gazów i skał, przejawiające się w wyrzutach dwutlenku węgla i skał, metanu i skał lub mieszaniny tych gazów, jak również innych gazów pochodzenia naturalnego, a także nagłym wypływem gazu,
- zagrożenie wybuchami pyłu węglowego, wynikające z możliwości detonacyjnego spalania się niebezpiecznej mieszaniny pyłu z powietrzem kopalnianym.

Oprócz wymienionych zagrożeń, wynikających głównie z przyczyn naturalnych, występują różnego rodzaju zagrożenia związane z działalnością człowieka w środowisku górnictwem. W tej grupie na uwagę zasługują zagrożenia powodowane środkami technicznymi stosowanymi w procesie produkcyjnym. Do grupy tej należy też większość zagrożeń elektrycznych – wywołanych zjawiskami elektrycznymi. Ich źródłem mogą być częściowo również przyczyny naturalne, jak np. wyładowania atmosferyczne i elektryczność statyczna. Decydujące jednak znaczenie mają urządzenia elektrotechniczne, które pośrednio mogą być przyczyną innych zagrożeń, np. pożarowych, wybuchowych i porażeniowych.

Specyficzność warunków górniczych powoduje, że współzależność zagrożeń występujących w kopalniach jest zwykle duża, a możliwość występowania i ich nasilenie zmieniają się w czasie.

Istotny wpływ na prawidłowe działanie urządzeń mają więc warunki ich pracy. Można je podzielić na warunki układowe, wynikające ze stanów pracy

i zjawisk występujących w układzie elektroenergetycznym, oraz warunki środowiskowe w miejscu pracy urządzenia.

Maszyny i urządzenia zasilane z baterii akumulatorowych przystosowane są przede wszystkim do pracy w stanach roboczych zwykłych, podczas których warunki pracy zmieniają się w nieznacznych granicach przewidzianych dla pracy długotrwałej. Występują również stany robocze niewłaściwe, w których urządzenia mogą i powinny zachować niezbędną zdolność do pracy przez określony, stosunkowo krótki czas. Nieuniknione są jednak również stany zakłóceń, podczas których warunki pracy uniemożliwiają spełnianie właściwych zadań urządzeń w układzie lub mogą spowodować ich uszkodzenie. Ważnym zadaniem jest zatem zmniejszanie prawdopodobieństwa występowania zakłóceń i ograniczenie ich skutków.

Wpływ warunków środowiskowych może być często decydujący np. urządzenia instalowane na zewnątrz mogą być narażone na działanie deszczu, śniegu, mrozu, wiatru, promieniowania słonecznego, zanieczyszczeń atmosferycznych itd. Warunki środowiskowe w pomieszczeniach mogą powodować także duże narażenia. W szczególności dotyczy to środowiska w podziemiach kopalń, które charakteryzuje się kumulowaniem narażeń środowiskowych, sprzyjających uszkodzeniom urządzeń i zagrożeń powodowanych przez te uszkodzenia.

4.1. Techniczne uwarunkowania środowiskowe podziemi kopalń

Specyfika warunków środowiskowych w podziemiach kopalń wynika przede wszystkim z dużej intensywności i efektu kumulowania się narażeń, jak i z faktu, że w głównej mierze jest to środowisko wytworzone przez czynniki techniczno-organizacyjne, czyli będące pośrednio efektem działalności ludzkiej. Dlatego również z tych względów ściśle rozgraniczenie poszczególnych rodzajów narażeń i zagrożeń jest bardzo trudne. Głównie dotyczy to rozgraniczenia narażeń antropogennych, będących wynikiem obecności i bezpośredniej działalności człowieka, od pozostałych. Należy przyjąć, że człowiek jest głównym czynnikiem środowiskowym kształtującym środowisko oraz środki ochrony środowiskowej, tak aby zapewniona była odpowiednia odporność urządzeń i bezpieczeństwo środowiska. Jest to mikroklimat techniczny, a w wielu przypadkach ma się do czynienia również z technokryptoklimatem tzn. z mikroklimatem wewnątrz zamkniętych urządzeń lub pomieszczeń wytworzonym środkami technicznymi.

Z punktu widzenia możliwości powstania określonych narażeń środowiskowych dla urządzeń elektrycznych instalowanych w podziemiach kopalń, jak również z uwagi na uczulenie środowiska na zagrożenia od tych urządzeń, należy uwzględnić przede wszystkim czynniki lub ich zespoły charakteryzujące powietrze i wody kopalniane. Jednocześnie koniecznym jest zwrócenie większej uwagi również na zjawiska charakteryzujące techniczne

warunki środowiskowe, rodzaj i nasilenie których w znacznej mierze są wynikiem rodzaju organizacji, technologii i techniki wydobywania, budowy geologicznej oraz zdarzeń losowych.

W ogólności warunki środowiskowe w podziemiach kopalń węgla można scharakteryzować określając:

- warunki klimatyczne, które obejmują zjawiska fizyczne, chemiczne i biotyczne związane z właściwościami atmosfery miejsca, w którym urządzenie jest instalowane, przechowywane bądź transportowane;
- warunki organizacyjno-techniczne, wynikające z rodzaju organizacji i procesu produkcyjnego oraz zastosowanych układów sieci elektroenergetycznej i rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń elektrycznych eksploatowanych w podziemiach kopalń.

Z grupy warunków klimatycznych w podziemiach kopalń można wyodrębnić takie czynniki, jak:

- temperatura powietrza,
- wilgoć atmosferyczna,
- rośnienie,
- zawartość soli i innych substancji mineralnych w atmosferze,
- zawartość gazów w atmosferze (agresywnych i wybuchowych),
- zapylenie atmosfery,
- działanie mikroorganizmów.

Z grupy warunków techniczno-organizacyjnych istotne są głównie następujące czynniki:

- nachylenie, grubość i głębokość zalegania pokładów,
- ruchy górotworu (tąpnięcia i zawały),
- wyrzuty gazów i skał,
- wybuchowość gazów i pyłów, palność materiałów oraz intensywność i sposób przewietrzania,
- system i zakres robót górniczych; stopień mechanizacji, rodzaj i jakość maszyn górniczych oraz sposób ich eksploatacji,
- brak światła słonecznego i naturalnej wentylacji oraz niedostateczne oświetlenie,
- zwarcia, przepięcia i prądy błędne,
- jakość konstrukcji, materiałów i wykonania urządzeń elektrycznych,
- układ sieci elektroenergetycznej i rodzaj zabezpieczeń oraz kultura ich eksploatacji.

Wpływ działania wymienionych czynników zależy od ich intensywności, jak również od jednoczesności ich występowania.

Należy podkreślić, że w warunkach podziemi kopalń szczególnie istotna jest koordynacja ochrony środowiskowej [1]. Duże również znaczenie ma ustalenie odpowiednich wymagań środowiskowych - zależnie od rodzaju urządzenia, jego budowy, przeznaczenia, rodzaju pomieszczeń i warunków użytkowania.

4.1.1. Charakterystyka narażeń

Narażenie to podleganie oddziaływaniu czynników niebezpiecznych, szkodliwych lub uciążliwych związanych z wykonywaniem pracy [1].

Jeden z ważniejszych narażeń w podziemiach kopalń stanowi temperatura powietrza, która zależy od głębokości, temperatury skał i powietrza wpływającego, intensywności przewietrzania, temperatury urobku, procesów utleniania oraz od przemian energii zachodzących w wyrobiskach podziemnych.

W kopalniach głębokich i przy znacznej długości wyrobisk temperatura powietrza w przodkach i szybach wydechowych praktycznie jest stała, niezależna od wahań temperatury na powierzchni. W otwartych wyrobiskach kopalń może wynosić od ok. 5 do $+30^{\circ}\text{C}$ przy pomiarze termometrem wilgotnym lub do $+33^{\circ}\text{C}$ przy pomiarze termometrem suchym. W zamkniętych jednak komorach, w których są ustawione urządzenia elektryczne, temperatura powietrza może być wyższa o kilka a nawet kilkanaście stopni w wyniku wydzielania ciepła przez te urządzenia i niedostatecznie intensywnej wentylacji. Jeszcze wyższą temperaturę, dochodzącą nawet do $+75^{\circ}\text{C}$, może osiągnąć powietrze bezpośrednio otaczające elementy lub podzespoły w złożonych urządzeniach elektrycznych i maszynach górniczych - w obudowach zamkniętych. Elementy przewodzące urządzeń i maszyn elektrycznych nagrzewają się wskutek strat energii przy obciążeniu oraz nagrzewają z kolei powietrze zawarte wewnątrz obudów, które utrudniają wymianę powietrza i odprowadzenie ciepła.

Wilgotność powietrza kopalnianego praktycznie nie zależy od średniej rocznej wilgotności względnej powietrza atmosferycznego, która w okręgu śląskim wynosi 78% przy średniej temperaturze $+7,8^{\circ}\text{C}$.

Na stan zawilgocenia w podziemiach kopalń mają wpływ głównie: ciśnienie barometryczne oraz głębokość kopalni, wilgotność skał i ich przenikalność, ilość oraz temperatura wód podziemnych, prędkość i ilość przepływającego powietrza, temperatura skał oraz długość dróg dolotowych, temperatura powietrza w kopalni oraz ilość i jakość powietrza sprężonego. Ponadto wilgotność względna zależy również od procesów nawilgocenia, takich jak: utlenianie, oddychanie ludzi, światło otwarte, procesy wiążące wilgoć

i system odwadniania. W kopalniach głębokich dodatkową przyczyną mogą być gorące źródła wody podziemnej.

Wilgotność względna powietrza kopalnianego nie jest jednakowa w różnych kopalniach, jak również w poszczególnych wyrobiskach tej samej kopalni. W szybach wdechowych oraz wyrobiskach przyszybowych kopalń węgla zależy ona głównie od ilości wody w szybie i w większości przypadków można przyjąć, że wynosi 90 do 95%. W chodnikach oraz szybach wentylacyjnych wilgotność względna powietrza osiąga prawie zawsze wartości 90 do 100%, podobnie jak w oddziałach i przodkach wydobywczych. Wyjątkowo suche są natomiast kopalnie soli (zwłaszcza potasowej), w których wilgotność wynosi 15 do 25%.

Zjawisko rosienia na wszelkiego rodzaju urządzeniach technicznych w podziemiach kopalń jest przede wszystkim wynikiem maksymalnego nasycenia powietrza parą wodną, w powiązaniu z następującymi przyczynami:

- wahaniami temperatury powietrza kopalnianego, wywołanymi np. zmianami temperatury powietrza na powierzchni (szczególnie w kopalniach płytkich oraz w szybach wdechowych i ich podszybiach),
- niższą temperaturą skał i urządzeń od temperatury powietrza w niektórych pomieszczeniach,
- mieszaniem się dwóch strumieni powietrza po przepłynięciu różnych dróg wentylacyjnych,
- osiadaniem, na urządzeniach, kropli wody zawieszonych w powietrzu w postaci mgły; źródłem powstawania mgły jest, oprócz kondensacji pary wodnej, porywanie kapiącej lub bryzgającej wody przez strumień płynącego z dużą prędkością powietrza (głównie w szybach),
- cyklicznym nagrzewaniem i stygnięciem urządzeń pracujących okresowo.

Intensywność rosienia jest wynikiem nasilenia i współdziałania podanych przyczyn w poszczególnych pomieszczeniach. Praktycznie należy się liczyć nawet z kilkakrotnym w ciągu doby rosieniem na elementach urządzeń elektrycznych.

Zawartość soli i innych substancji mineralnych w atmosferze podziemi kopalń węgla może być stosunkowo duża. Powietrze kopalniane obok ciał stałych (pyłów) i gazów zawiera zanieczyszczenia w postaci drobnych kropelek wody. Wynikiem tego są aerozole, które nie zawierają czystej wody, lecz przeważnie stanowią roztwory różnych substancji mineralnych i organicznych. Powietrze jest więc zanieczyszczone tymi samymi substancjami, jakie zawierają wody kopalniane.

Pyłem kopalnianym nazywa się drobne cząstki skał o średnicy poniżej 1 mm. Ilość i jakość pyłu kamiennego zależą od warunków naturalnych, takich jak petrograficzna struktura pokładu i warunki tektoniczne, oraz od sposobu urabiania i stanu technicznego narzędzi. W kopalniach węgla najwięcej pyłu powstaje podczas urabiania, ładowania i transportowania oraz wskutek oddziaływania ciśnienia górotworu i tąpnięć, jak również wyrzutów gazu i węgla z calizny. Ilość pyłu ocenia się nawet na kilkanaście procent wydobycia.

Część pyłu kopalnianego jest wywożona z urobkiem na powierzchnię, reszta natomiast osadza się na urządzeniach technicznych i wyrobiskach oraz jest unoszona z powietrzem wentylacyjnym, powodując jego dodatkowe zanieczyszczenie.

Do głównych narażeń związanych z warunkami organizacyjno-technicznymi należy zaliczyć:

- możliwość zalewania lub zraszania wodą; urządzenia elektryczne są narażone w podziemiach kopalń na działanie wody kapiącej i bryzgającej, np. z systemów zmniejszających zapylenie. Mogą też one nawet przejściowo znajdować się w wodzie, np. w przypadku zalania podczas nagłych przepływów wody naturalnej lub, podsadzkowej; Woda kopalniana, obok zanieczyszczeń chemicznych, takich jak sole, kwasy i zawiesiny koloidalne, może być zanieczyszczona również pyłem lub miałem węglowym, piaskiem z podsadzki hydraulicznej oraz szczątkami materiałów różnego pochodzenia i o różnym składzie chemicznym;
- działanie prądów błądzących (występujących głównie wskutek stosowania trakcji elektrycznej przewodowej) oraz prądów upływu w sieciach prądu przemiennego;
- działanie łuku elektrycznego wzmożone przez silną jonizację powietrza wewnątrz zamkniętych komór łączników w wyniku kilkakrotnie szybko po sobie następujących cykli łączeniowych.

Z narażeń mechanicznych występujących w podziemiach kopalń należy wymienić:

- wstrząsy i udary podczas transportu do oddziałów produkcyjnych i przemieszczania towarzyszące postępowi robót górniczych,
- wstrząsy i wibracje powodowane pracą urządzeń lub ich elementów zabudowanych w kadłubach maszyn górniczych bądź innych urządzeń zespołowych,
- udary powodowane wyrzutami węgla lub skał, oraz ich spadającymi odłamkami,

- statyczne naprężenia rozciągające i ściskające wynikające ze stromości wyrobisk oraz ruchów górotworu,
- naprężenia dynamiczne spowodowane wyrzutami gazów i skał,
- pozostałe narażenia spowodowane innymi urządzeniami technicznymi (np. maszynami roboczymi) i inną działalnością produkcyjną człowieka (np. robotami strzelniczymi).

4.1.2. Charakter zagrożeń

Zagrożenie to zjawisko wywołane działaniem sił natury bądź człowieka, które powoduje, że poczucie bezpieczeństwa maleje bądź zupełnie zanika.

Do podstawowych czynników sprzyjających uczuleniu środowiska górniczego i nasileniu skutków zagrożeń należy zaliczyć przede wszystkim:

- obecność metanu i pyłu węglowego oraz węgla, drewna i innych materiałów łatwo palnych,
- obecność zmineralizowanej dobrze przewodzącej wody, powszechność i duża ilość mas metalowych oraz duża wilgotność i podwyższona temperatura powietrza,
- brak światła słonecznego i ograniczone możliwości oświetlenia sztucznego, niedostateczna wentylacja, praca bez odzieży, ogólna dostępność urządzeń oraz stosowanie strzelania elektrycznego,
- koncentracja wydobywania i kompleksowa mechanizacja.

Wpływ wymienionych powyżej czynników może być różnorodny. W zasadzie wszystkie z nich w odpowiednim stopniu przyczyniają się do powiększania ujemnych skutków możliwych zagrożeń elektrycznych, które jakościowo mogą przejawiać się następująco:

- rażenie prądem elektrycznym, bezpośrednio lub pośrednio,
- pożar zapoczątkowany zapłonem wywołanym skutkami cieplnymi przepływu prądu lub łukiem elektrycznym,
- wybuch zainicjowany łukiem, iskrą lub cieplnymi skutkami przepływu prądu elektrycznego,
- przedwczesne odpalenie zapalników elektrycznych wywołane prądami błędzącymi i/lub napięciami indukowanymi,
- korozja elektrolityczna powodowana prądami błędzącymi,
- zakłócenia w pracy innych urządzeń, szczególnie łączności sygnalizacji i sterowania, wywołane polami elektrycznymi i elektromagnetycznymi.

4.1.2.1. Pomieszczenia i/lub strefy zagrożone wybuchem pyłu węglowego

Wybuch pyłu węglowego jest to egzotermiczna reakcja chemiczna, przebiegająca w bardzo krótkim czasie, powodująca powstanie znacznej ilości gazów w wyniku czego następuje gwałtowny wzrost ciśnienia, który w postaci fali podmuchu rozprzestrzenia się od miejsca zainicjowania wybuchu. Może powstać w pomieszczeniach, w których pył węglowy jest skłębiony w powietrzu (zsuwnie spiralne, sortownie, młynownie) oraz w przypadku uniesienia osiadłego pyłu w wyniku wybuchu metanu, tąpnięcia, robót strzelniczych, urządzeń elektrycznych lub z innych przyczyn. W celu zmniejszenia zapylenia (zagrożenia pyłowego) stosuje się hermetyzację urządzeń pyłotwórczych, zraszanie wodą, odpylanie oraz sprzątanie.

W podziemnych wyrobiskach górniczych ustalone zostały dwie klasy zagrożenia wybuchem pyłu węglowego, a mianowicie [19]:

- klasa A zagrożenia wybuchem pyłu węglowego zalicza się tutaj pokład węgla lub jego część, łącznie z wyrobiskami drążonymi w tym pokładzie lub jego części, jeżeli w tym pokładzie lub jego części lub w wyrobiskach lub ich częściach znajduje się pył kopalniany zabezpieczony w sposób naturalny;
- do klasy B zagrożenia wybuchem pyłu węglowego zalicza się pokład węgla lub jego część, łącznie z wyrobiskami drążonymi w tym pokładzie lub jego części, jeżeli w tym pokładzie lub jego części lub w wyrobiskach lub ich częściach nie znajduje się pył kopalniany zabezpieczony w sposób naturalny.

4.1.2.2. Pomieszczenia niebezpieczne pod względem pożarowym

Urabianie węgla i jego transport powodują tworzenie się osadów pyłu, które sprzyjają rozwijaniu się pożarów.

Zapalenie materiałów palnych w pomieszczeniach, w których instalowane są urządzenia elektryczne, w ogólnym przypadku może być wynikiem przeciążeń długotrwałych i zwarć, szczególnie łukowych oraz działania prądu upływu (o stosunkowo niewielkiej wartości), pojawiający się podczas przyłożenia napięcia do dielektryka (izolatora). Przepływ prądu upływu w dielektrykach stałych odbywa się dwoma drogami: na wskroś dielektryka (płynący przez dielektryk) lub po powierzchni dielektryka (tworząc prąd powierzchniowy), np. przy drobnym uszkodzeniu mechanicznym kabla energetycznego. W podziemiach kopalń jest to prąd, który jest monitorowany przez urządzenia pomocnicze odpowiedzialne za bezpieczeństwo eksploatacji. Po przekroczeniu określonej jego wartości następuje wyłączenie obwodu.

Decydujące znaczenie ma energia cieplna wydzielana w miejscu uszkodzenia, warunki chłodzenia, wymiary oraz wilgotność materiałów palnych, ich odległość i usytuowanie względem łuku oraz czas jego działania. Koniecznym jest więc stosowanie odpowiednio wytrzymałych osłon zapobiegających wystąpieniu łuku otwartego w otoczeniu materiałów łatwo palnych.

4.2. Zagrożenia wskutek uszkodzeń urządzeń elektrycznych górniczych

Uszkodzenia elektrycznych urządzeń górniczych mają duży wpływ na stan bezpieczeństwa załogi i ruchu górniczego oraz na dodatkowe straty materialne, wynikające z przerw w procesie produkcji górniczej. Praktycznie każde uszkodzenie, wywołuje w kopalni stan zagrożenia, zwiększając prawdopodobieństwo występowania nieszczęśliwych wypadków. Do powstania pożaru lub zapłonu konieczne jest zaistnienie jednocześnie: stanu zagrożenia oraz odpowiednich, sprzyjających warunków otoczenia.

W wyniku analizy wieloletnich danych statystycznych można stwierdzić, że urządzenia elektryczne były przyczyną średnio jednej trzeciej wszystkich wybuchów metanu oraz pyłu węglowego w kopalniach [1]. Większe zagrożenie stanowiły tylko roboty strzelnicze. Wśród urządzeń elektrycznych najczęściej wybuchów spowodowały uszkodzone kable i przewody oponowe: średnio 50% do 60% wszystkich wybuchów zaistniałych z przyczyn elektrycznych. Pozostałe przyczyny, to przede wszystkim: naruszenie ognioszczelności aparatów i silników, uszkodzenie kloszy lamp oświetlenia elektrycznego oraz nieprzestrzeganie przepisów i instrukcji.

4.3. Zagrożenia wskutek uszkodzeń urządzeń mechanicznych górniczych

Zagrożenia mechaniczne w kopalniach węgla kamiennego stanowią istotne ryzyko, które może prowadzić do uszkodzenia obudów maszyn i urządzeń górniczych zasilanych z baterii akumulatorowych złożonych z ogniw litowych.

W kopalniach istnieje ryzyko uszkodzenia mechanicznego na skutek uderzenia, zgniecenia, wstrząsów, przegrzania lub innych czynników mechanicznych, wskutek których może dojść do uszkodzenia ogniw litowych. Taka sytuacja może zaistnieć również w wyniku zaplątania lub wpłątania podczas pracy z ruchomymi częściami maszyn, spadających przedmiotów lub przemieszczających się skał.

Mechaniczne urządzenia górnicze, takie jak wiertnice, ładowarki i przenośniki, mogą generować znaczne wibracje i naciski, które mogą uszkodzić obudowy maszyn i urządzeń górniczych zasilanych z baterii akumulatorowych złożonych z ogniw litowych. Uszkodzenia te mogą

prowadzić do krótkotrwałych zwarc, przegrzewania się, a nawet eksplozji ogniwo litowych. Dlatego ważne jest, żeby obudowy były odpowiednio zaprojektowane i wytrzymałe, tak aby chronić ogniwa litowe przed uszkodzeniami mechanicznymi.

Dodatkowo, regularne inspekcje i konserwacja mogą pomóc w wykrywaniu i naprawie uszkodzeń obudów, zanim dojdzie do poważniejszych uszkodzeń. Wszystko to jest kluczowe dla bezpieczeństwa i efektywności operacji górniczych.

Omówione powyżej zagrożenia, których skutki są szczególnie duże w górnictwie, mogą mieć również wpływ na eksploatację maszyn i urządzeń górniczych zasilanych z baterii akumulatorowych złożonych z ogniwo litowych. Istotna dla bezpieczeństwa jest więc prawidłowa eksploatacja ogniwo litowych.

5. Układy zarządzania pracą i balansowania ogniw litowych (BMS)

System zarządzania i kontroli BMS (Battery Management System) pracy akumulatora jest ważnym elementem wyposażenia maszyn i urządzeń elektrycznych zasilanych z baterii ogniw litowych pracujących również w polskich kopalniach. Monitoring i sterowanie przebiegiem procesu gromadzenia energii w zestawach ogniw (akumulatorach) powinno służyć temu, aby ogniwa mogły być użytkowane, jak najdłużej, jako niezawodne i stabilne źródła energii elektrycznej, charakteryzując się przy tym dużą sprawnością oraz wysokim poziomem bezpieczeństwa pracy [20].

System BMS realizuje więc kilka istotnych funkcji, takich jak: monitorowanie wartości napięcia układu, prądu i temperatury, kontrola poziomu naładowania ogniw, kontrolowanie procedury ładowania/rozładowywania, pozyskiwanie danych, komunikacja z modułami wewnętrznym i zewnętrznymi, monitorowanie i przechowywanie wcześniejszych danych oraz wyrównywanie napięcia na ogniwach akumulatorowych zwanym balansowaniem ogniw.

Rozbieżność parametrów ogniw w akumulatorze ma bardzo duże znaczenie dla długości życia akumulatora. Wartości napięć bowiem pojedynczych ogniw mogą, po pewnym czasie, znacznie różnić się od siebie. Pojemność zaś całego akumulatora również może wówczas szybko zmniejszać się w trakcie pracy, co skutkuje utratą całkowitej przydatności systemu akumulatorowego do dalszej pracy. Stosowanie więc skutecznego systemu BMS staje się koniecznością.

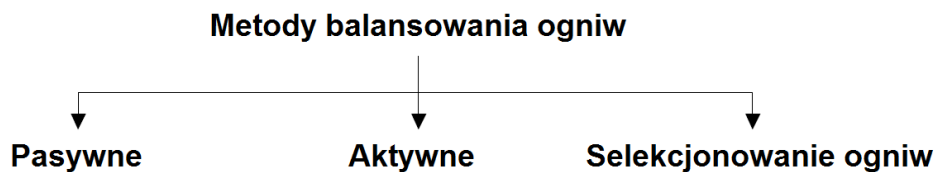
5.1. Balansowanie (równoważenie) ogniw

Balansowanie ogniw w akumulatorze, polega na zrównaniu stanu naładowania wszystkich ogniw do jednego poziomu. Jest to konieczne, ponieważ poszczególne ogniwa tego samego typu i wytwarzane przez tego samego producenta, mogą różnić się między sobą parametrami (poziomem maksymalnego rozładowania, pojemności czy wartością rezystancji wewnętrznej). Te różnice mogą pogłębiać się w trakcie eksploatacji. Dodatkowym niekorzystnym czynnikiem może być praca poszczególnych ogniw w różnych temperaturach. Skutkuje to w efekcie końcowym 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 zestawu ogniw jest zatem zalecane już w przypadku baterii składających się z co najmniej trzech ogniw, zaś w przypadkach większej liczby, staje się koniecznością [21-22].

Balansowanie ogniw może być pasywne lub aktywne stąd stosowane metody nazywane są pasywnymi i/lub aktywnymi metodami balansowania ogniw [23-24].

Można je podzielić na trzy główne grupy (rys. 5.1):

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



Rys. 5.1. Metody balansowania ogniw

5.1.1. Balansowanie ogniw metodą ich doboru (selekcjonowania)

Bateria akumulatorowa składana jest wówczas z dokładnie wyselekcjonowanych pod względem parametrów ogniw. Są one dobierane ściśle pod względem takich samych właściwości elektrochemicznych. Taki sposób doboru ogniw nie wymaga wówczas ich (równoważenia) balansowania. Różnice bowiem wartości znamionowych ich napięcia i prądu są praktycznie pomijalne [25].

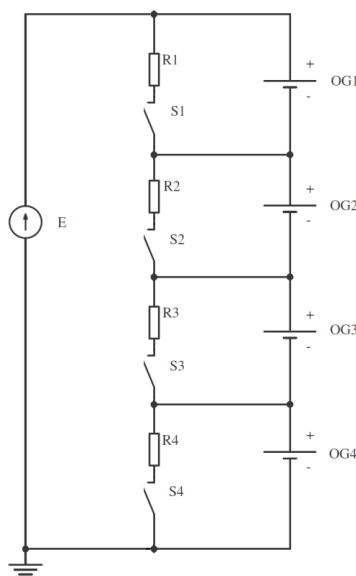
Sposób ten nie zapewnia jednak utrzymania baterii ogniw połączonych szeregowo w równowadze przez cały czas trwania eksploatacji. Po dłuższym bowiem czasie pracy mogą wystąpić znaczące różnice ich parametrów związane z ich samowyladowaniem oraz różnym poziomem naładowania wynikającym z różnego stopnia starzenia się samych ogniw.

5.1.2. Pasywne balansowanie ogniw

Balansowanie pasywne polega na zamianie (rozpraszanie na ciepło) nadwyżki energii elektrycznej za pomocą odpowiednio dobranych 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. Jeżeli napięcie któregoś z ogniw znacząco przekroczy wartość pozostałych, to zostaje zamknięty odpowiedni bocznikujący go łącznik. Skutkuje to

rozładowaniem danego ogniwa, poprzez element obwodu równoważenia pasywnego – rezystor, połączony równolegle z każdym ogniwem. Trwa to aż do momentu, gdy napięcie ogniwa przeładowanego zrówna się z wartością napięcia pozostałych ogniw. Wówczas ładowanie pakietu ogniw zaczyna być kontynuowane przy równoczesnej kontroli on-line wartości napięć wszystkich pozostałych ogniw. Ideę układu połączeń pasywnego równoważenia ogniw przedstawiono na rys. 5.2.

Pasywne równoważenie ogniw jest prostym w realizacji i stosunkowo tanim sposobem. Ma jednak szereg wad. Jedną z nich jest mała sprawność, wynikająca z faktu, że w niezrównoważonych układach ogniw, nadmiar energii jest tracony na ciepło na odpowiednio dobranym rezystorze. Prowadzi to jednak do mniejszej efektywności. Rezystor jest elementem obwodu, który określa wartość przepływającego prądu, a energia, która jest tracona na rezystorze, jest zamieniana na ciepło. Jest to jeden z powodów, dla których efektywność ogniw jest często niższa niż optymalna.



Rys. 5.2. Obwód pasywnego balansowania ogniw

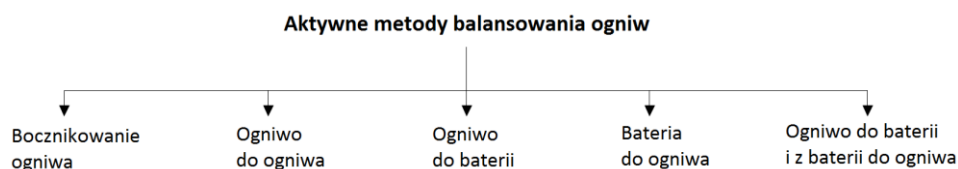
Należy podkreślić, że całkowita pojemność zestawu baterii jest ograniczona koniecznością dobrania poziomu naładowania ogniw do pojemności „najsłabszego”, ogniwa tzn. takiego, posiada najmniej zgromadzonej energii. Jest więc to takie ogniwo, na którego zaciskach napięcie w porównaniu z innymi ogniwami akumulatora jest najniższe, ale nie mniejsze niż dopuszczalne przez producenta.

Równoważenie pasywne może być więc realizowane wyłącznie w czasie trwania procesu ładowania ogniw. Nie można jednak w ten sposób zapobiec nieznaczniom równoważeniu ogniw, które pojawiają się w trakcie ich użytkowania, i które jest zwykle następstwem, efektu ich samorozładowywania się [26-27].

5.1.3. Aktywne balansowanie ogniw

Alternatywą pasywnej metody jest aktywne balansowanie ogniw. Jego zasada polega na zastosowaniu dodatkowego zewnętrznego układu sterującego umożliwiającego aktywny transfer energii pomiędzy ogniwami. Metodę aktywnego balansowania można stosować dla większości nowoczesnych ogniw z grupy litowej; temperatura ogniw, musi być jednak ściśle kontrolowana w zakresie bezpiecznej pracy [28-29].

Jest wiele sposobów (metod) aktywnego balansowania ogniw i w różny sposób są one eksponowane. Ze względu na przykład na sposób transferu energii, metody te są grupowane w pięciu podstawowych podkategoriach (rys. 5.3): 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)) [30-31].



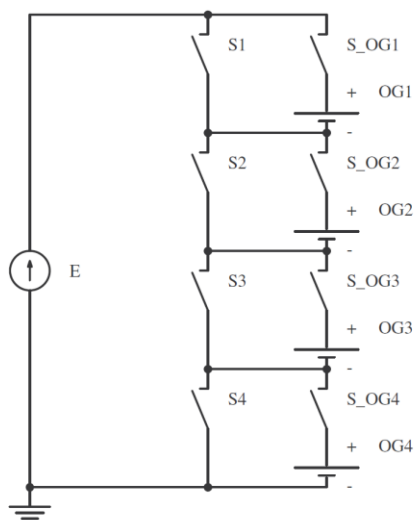
Rys. 5.3. Aktywne metody balansowania baterii ogniw

5.1.3.1. Metoda bocznikowania ogniw

Metodę bocznikowania ogniw, w zależności od sposobu, można podzielić na trzy grupy: całkowite bocznikowanie ogniwa, zastosowanie bocznika rezystorowego i/lub bocznika tranzystorowego.

Całkowite bocznikowanie ogniw

W tym przypadku wszystkie ogniwa baterii są połączone ze sobą za pomocą dwóch łączników albo jednego łącznika dwukierunkowego. Zbocznikowane ogniwo następuje wówczas, gdy jego napięcie przekroczy maksymalną dopuszczalną wartość. W tej metodzie ważna jest strategia sterowania. Zaletą tego sposobu jest niski koszt i duża wydajność. Może być tutaj zastosowana z powodzeniem budowa modułowa, co daje łatwość rozbudowy układu (rys. 5.4).

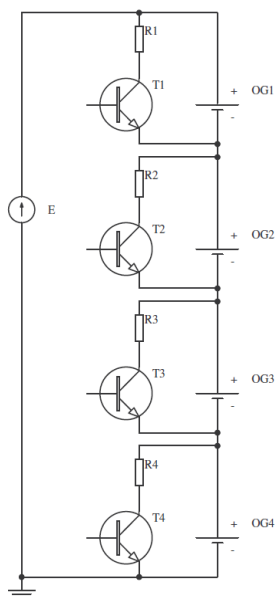


Rys. 5.4. Bocznikowanie całkowite ogniwa

Główną wadą tej metody jest jednak fakt, że nadmiar energii z ogniwa o wyższych wartościach napięć jest rozpraszany w postaci ciepła, co skutkuje krótszym czasem pracy akumulatora zwłaszcza podczas rozładowywania.

Bocznik rezystorowy

W całej baterii do wszystkich ogniwa są przyłączone równolegle rezystory sterowane kluczami tranzystorowymi (rys. 5.5).

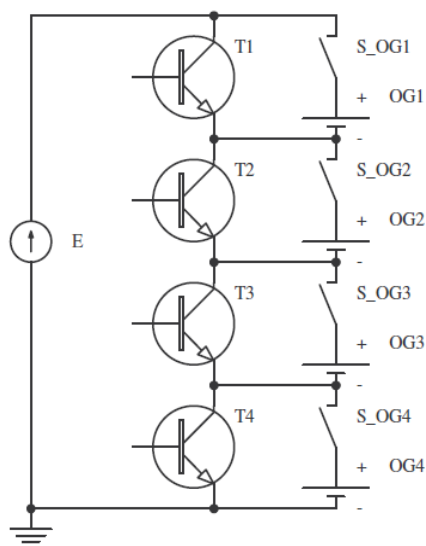


Rys. 5.5. Bocznikowanie rezystorowe

Klucze tranzystorowe mogą być sterowane dwoma różnymi sposobami: w pierwszym, wszystkie sterowane są tym samym sygnałem, to znaczy, że są albo załączone, albo wyłączone w tym samym czasie. W drugim zaś, wartość napięcia na ogniwach jest monitorowana i każda jego zmiana jest rejestrowana przez sterownik. Wówczas po wykryciu różnicy napięć na poszczególnych ogniwach, sterownik decyduje, który klucz tranzystorowy ma być wystawiony i załączyć bocznik rezystorowy. Zaletą tej metody jest przede wszystkim niski koszt i łatwy montaż. Główną wadą zaś jest natomiast fakt, że metoda ta może być stosowana tylko w układach baterii akumulatorowych małej mocy, ze względu na zbyt małą moc rozproszenia ciepła przez rezystory bocznikujące.

Bocznik tranzystorowy

Idea działania bocznika tranzystorowego jest taka sama jak w metodzie bocznika rezystorowego. Tranzystory są połączone równolegle z każdym ogniwem w baterii, jak ilustruje to rys. 5.6. Podczas ładowania, gdy ogniwo osiąga maksymalną wartość napięcia, załączany jest odpowiedni bocznik (czyli tranzystor) tak, aby "przekierować" prąd ładowania do następnego ogniwa. W ten sposób, prąd elektryczny jest bocznikowany przez tranzystor, co skutkuje zakończeniem procesu ładowania zbocznikowanego ogniwa.



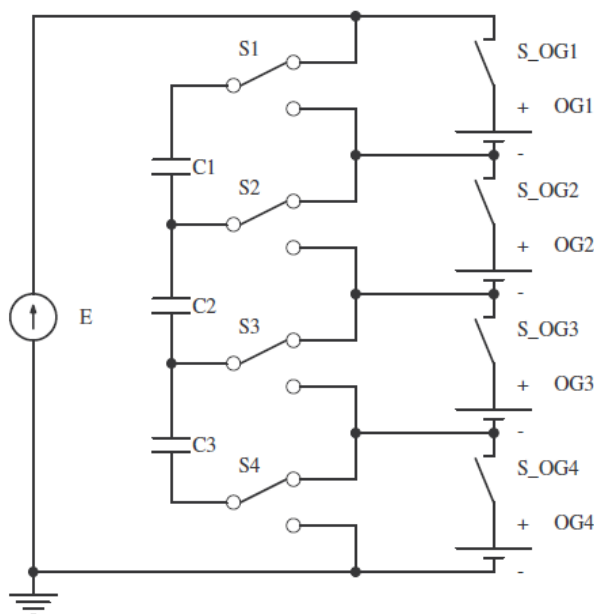
Rys. 5.6. Bocznikowanie tranzystorowe

Porównując powyższe ze sposobem bocznikowania rezystorowego, można stwierdzić, że bocznikowanie tranzystorowe zmniejsza straty energii. Nie potrzebna jest również inteligentna kontrola (monitoring) i dlatego koszt tego rozwiązania jest niższy.

5.1.3.2. Metoda ogniwo do ogniwa

W metodzie ogniwo do ogniwa balansowanie realizowane jest na drodze transferu energii pomiędzy ogniwami najbardziej i najmniej naładowanymi.

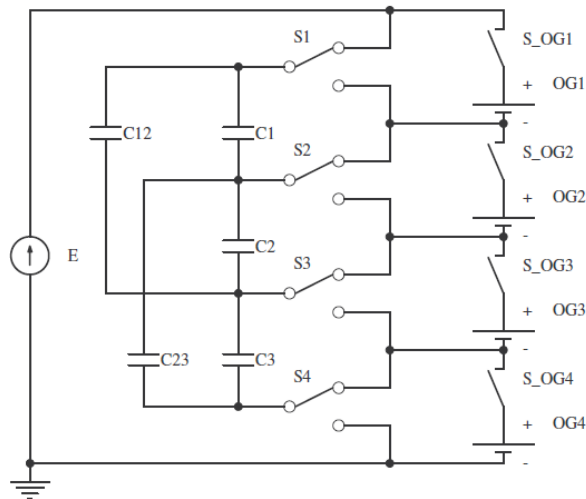
Elementem magazynującym energię jest przełączalny kondensator. Istotą działania tego układu jest odbieranie porcji energii z jednego ogniwa, chwilowym magazynowaniu jej w kondensatorze, a następnie przekazaniu jej do kolejnego ogniwa. Układ sterowania umożliwia łączenie kondensatora kolejno z każdym ogniwem za pośrednictwem kluczy tranzystorowych. W zależności od różnicy potencjałów pomiędzy ogniwami, kondensator oddaje i/lub magazynuje energię. Następują wówczas kolejne przełączenia, aż do ostatniego ogniwa, a następnie cykl jest powtarzany do czasu zrównoważenia baterii. Kondensator uśrednia w efekcie wartości napięcia pomiędzy ogniwami. Ta metoda jest jednak mało wydajna, ponieważ różnice napięć pomiędzy ogniwami w akumulatorze są minimalne (rzędu miliwoltów). Jej zastosowanie ogranicza się więc do akumulatorów składających się z niewielkiej liczby ogniw i małej pojemności (rys. 5.7).



Rys. 5.7. Metoda przełączalnego kondensatora

Główną zaletą jednak tej metody jest duża wydajność, mała złożoność układu elektronicznego oraz możliwość przełączania dużych wartości prądów. Główną wadą natomiast jest mała prędkość przełączania kondensatora, spowodowana wymaganymi wartościami czasu niezbędnymi na uzyskanie naładowania.

Rozwiniętą wersją metody przełączanego kondensatora jest zastosowanie kondensatora dwupoziomowego. Różni się to tym, że oprócz kondensatorów przyłączonych równoległe za pomocą wyłączników do ogniw, są jeszcze dodatkowo połączone kondensatory równoległe do dwóch ogniw jednocześnie. Takie połączenie zmniejsza czas trwania działania całego układu o połowę. Zalety i wady takiego sposobu są porównywalne do metody przełączanego kondensatora (rys. 5.8).



Rys. 5.8. Metoda podwójnego przełączanego (dwupoziomowego) kondensatora

Zaletą tego rozwiązania są mniejsze wartości pojemności zastosowanych kondensatorów, stąd mniejsze prądy wyrównawcze oraz jednocześnie większy przepływ energii pomiędzy ogniwami całej baterii. Główną wadą jest natomiast mała prędkość łączenia pomiędzy kondensatorami oraz większe „straty czasu” związane z naładowaniem się kondensatorów.

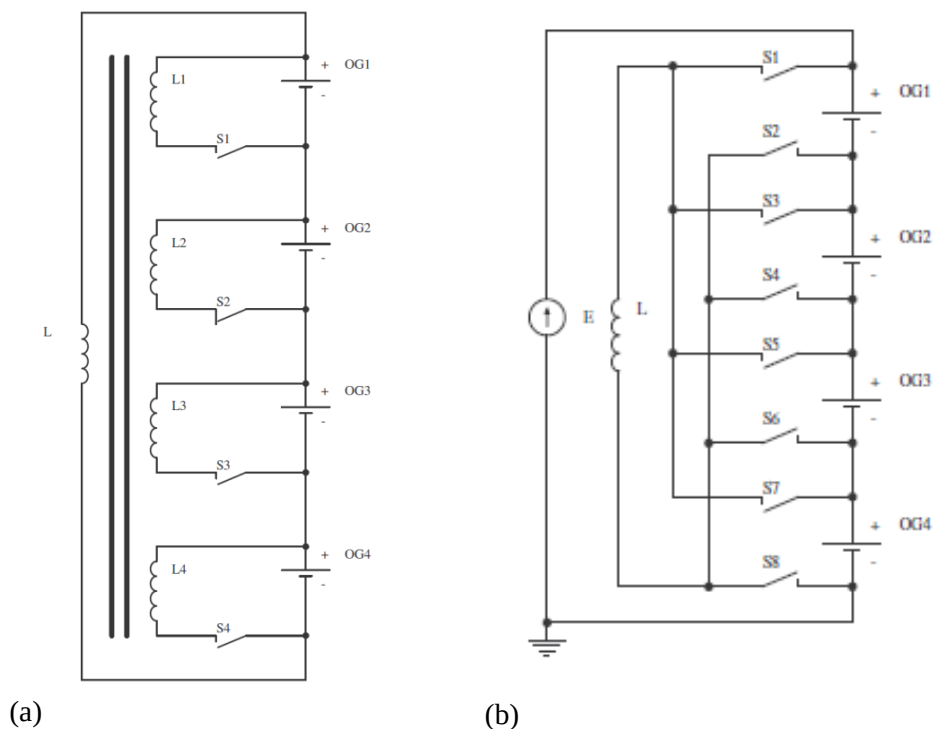
5.1.3.3. Metoda ogniwo do baterii

W metodzie ogniwo do baterii, balansowanie polega na transferze energii z ogniwa najbardziej naładowanego do całej baterii.

Pojedyncza/Zwielokrotniona-Cewka

W tej metodzie do wyrównywania ogniw wykorzystywana jest jedna lub kilka cewek, jak pokazano na rysunku 5.9. System wyrównujący z jedną cewką pokazany na rysunku 5.9a wykorzystuje jedną cewkę do transferu energii wewnątrz całego pakietu. Sterownik mierzy wówczas wartość napięcia na ogniwach i wybiera spośród nich dwa ogniwa, które będą wykorzystywane do przenoszenia energii. W systemach z wieloma cewkami, korzysta się z $n-1$ cewek w celu wyrównania n ogniw (patrz rys. 5.9b) i sterownik ten mierzy

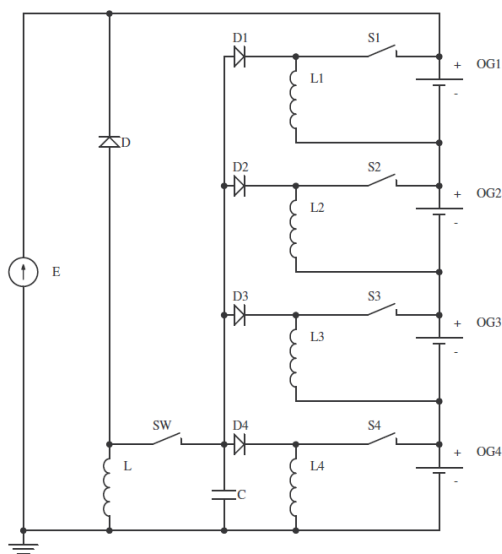
różnicę napięcia pomiędzy dwoma sąsiadującymi ze sobą ogniwami, a następnie stosuje modulację PWM z warunkiem określającym, że ogniwo o wyższym poziomie naładowania musi być przełączone w pierwszej kolejności. Główną wadą tej metody jest jednak fakt, że wymagany jest znaczny czas niezbędny do transferu energii z pierwszego ogniwa do ostatniego, zwłaszcza w bateriach o długich łańcuchach ogniw. Pojedyncza bowiem cewka potrzebuje mniej czasu na transfer energii niż topologia opierająca się na kilku cewkach.



Rys. 5.9. Topologie wyrównywania ogniw za pomocą pojedynczej/zwielokrotnionej liczby cewek a) z pojedynczą cewką i b) z wieloma cewkami

Doładowanie bocznikujące

W metodzie tzw. doładowania bocznikującego, napięcie jest mierzone na pojedynczych ogniwach zaś przełącznik ogniw o wyższym napięciu jest aktywowany za pomocą głównego sterownika. Przełącznik jest sterowany sygnałem z modulacją PWM. Ideowy schemat połączeń układu doładowania bocznikującego pokazano na rys. 5.10.



Rys. 5.10. Idea doładowania bocznikującego

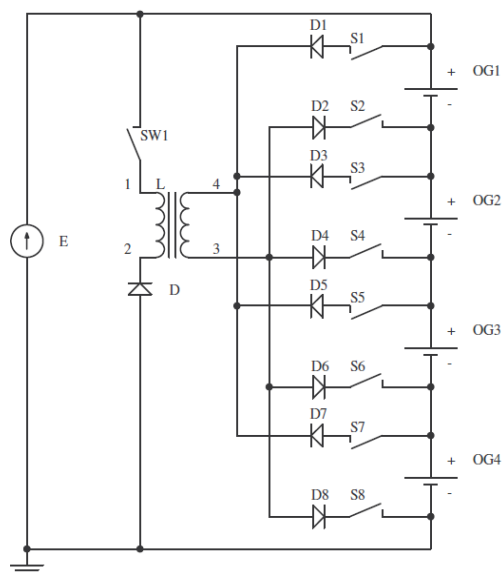
Układ pracuje jako konwerter doładowania. Zwraca nadmiar energii do pozostałych ogniw połączonych w jednym szeregu.

Układ jest stosunkowo prosty i tylko część jego elementów jest wykorzystywanych podobnie, jak w innych zaawansowanych metodach równoważenia.

5.1.3.4. Metoda bateria do ogniwa

Metoda bateria do ogniwa polega na przekazywaniu energii z całej baterii do najsłabszego ogniwa. Stosowany jest tutaj transformator, którego uzwojenie pierwotne jest podłączone do całego pakietu ogniw, a uzwojenie wtórne, poprzez prostownik i za pomocą kluczy tranzystorowych, do danego ogniwa, które zostało wybrane przez sterownik elektroniczny (rys. 5.11). Energia przekazywana jest w postaci krótkich impulsów.

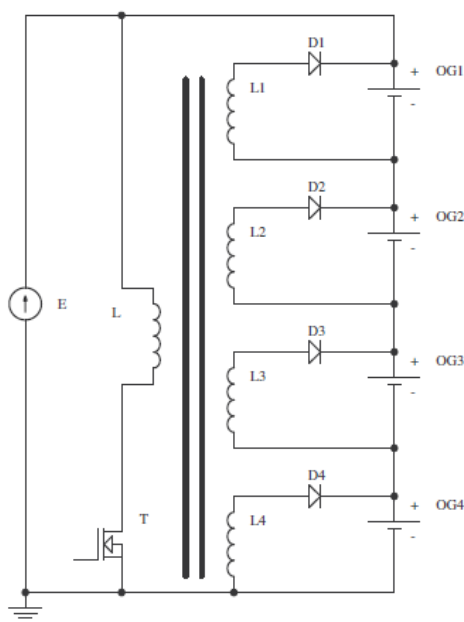
Ta metoda pozwala na szybkie wyrównywanie poziomu naładowania poszczególnych ogniw, lecz jej sprawność jest niska z powodu strat przełączeniowych i strat mocy w obwodzie magnetycznym.



Rys. 5.11. Obwód aktywnego balansowania ogniw metodą transformatora z przełączalnym uzwojeniem wtórnym

Transfer energii do wszystkich ogniw

Ta wersja wymaga użycia specjalnie wykonanego transformatora, o wspólnym rdzeniu z nawiniętymi uzwojeniami pierwotnym i wtórnymi. Uzwojenie pierwotne transformatora jest przyłączane do całej baterii, natomiast uzwojenia wtórne, których liczba jest równa liczbie ogniw w baterii, są przyłączane do poszczególnych ogniw. Takie połączenie powoduje, że napięcie na uzwojeniach wtórnych jest średnią arytmetyczną napięć wszystkich ogniw (rys. 5.12).



Rys. 5.12. Obwód aktywnego balansowania ogniw metodą transformatora wielouzwojeniowego

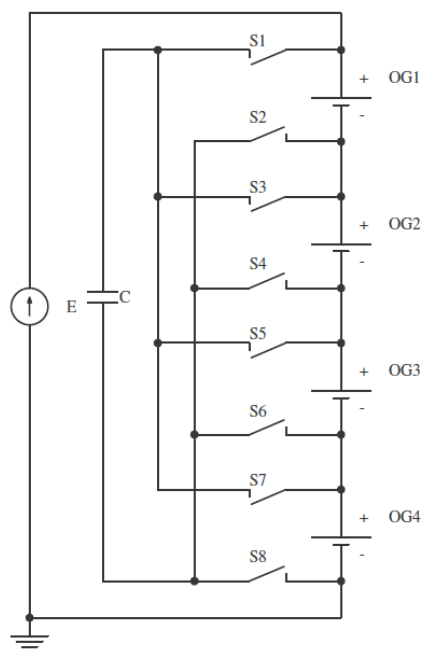
Zaletą tej metody jest jednak szybkie zbalansowanie akumulatora o dużej liczbie ogniw, przy minimalnych stratach. Wadą natomiast jest konieczność zastosowania złożonej konstrukcji transformatora oraz dużej liczby prostowników (dla każdego ogniwa) z uwagi na fakt pobierania energii do balansowania z całej baterii.

5.1.3.5. Metoda ogniwo do baterii i do ogniwa

Ta metoda stanowi kombinację dwóch wcześniej opisanych metod, czyli metody ogniwo do baterii i bateria do ogniwa. W ten sposób energia z najbardziej naładowanego ogniwa może być przenoszona do najmniej naładowanego ogniwa lub do całej baterii lub/i z baterii do najsłabszego ogniwa.

Kondensator pojedynczego przełączania

Ta metoda opiera się na magazynowaniu energii w kondensatorze. Sterownik elektroniczny monitorujący napięcie na całej baterii łączy kondensator z ogniwnem, w którym został wykryty nadmiar energii a następnie podłącza kondensator do całej baterii, w celu przekazania energii. W przypadku wykrycia ogniwa o najniższym napięciu kondensator jest łączony z baterią i pobiera energię a następnie zostaje połączony do wybranego ogniwa by oddać pobraną energię (rys. 5.13).

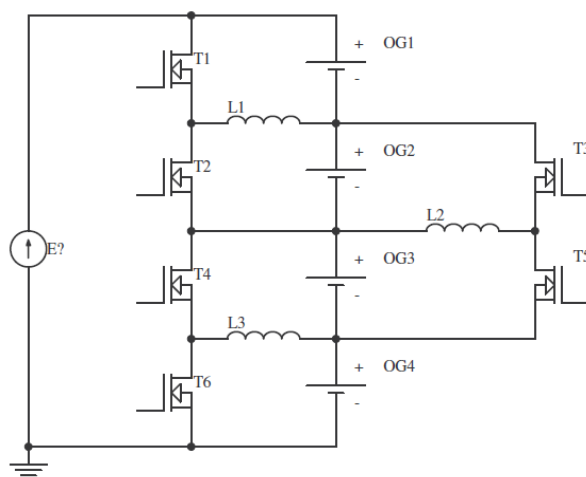


Rys. 5.13. Metoda kondensatora pojedynczego przełączania

Zaletą metody jest niski koszt i wysoka sprawność oraz jednocześnie możliwość transferu większej ilości energii między ogniwami całej baterii. Natomiast główną wadą jest mała prędkość działania łączników pomiędzy kondensatorami oraz większe straty czasu potrzebne na naładowanie się kondensatora.

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 o najniższym napięciu. Energia jest najpierw przenoszona z ogniwa o najwyższym napięciu do indukcyjności, w której jest magazynowana, a następnie indukcyjność przekazuje energię do ogniwa o najniższym napięciu. Transfer energii oraz kierunek przepływu są kontrolowane mikrokontrolerem, który poprzez aktywowanie sygnałem PWM steruje odpowiednimi tranzystorami (rys. 5.14).



Rys. 5.14. Bocznikowe sterowanie przez PWM

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

6. Kryteria oceny stosowania ogniw litowych w przemyśle węglowym

Problemy trwałości i bezpieczeństwa oraz efektywności energetycznej, jako jedno z podstawowych kryteriów oceny funkcjonalności obiektów technicznych, od wielu dziesiątek lat nurtują zarówno środowiska naukowe, jak również konstruktorów, wytwórców i użytkowników maszyn i urządzeń. Odnosi się to zwłaszcza do tych przypadków zastosowania maszyn przemysłowych, gdzie wymagane jest bezwzględne spełnienie kryterium odnośnie do wymaganej trwałości maszyn pracujących w warunkach ekstremalnych obciążeń (a szerzej - różnorodnych wymuszeń) eksploatacyjnych. Problem ten dotyczy w szczególności maszyn i urządzeń stosowanych zarówno w górnictwie podziemnym, jak i odkrywkowym. Kluczowym staje się, więc problem bezpiecznego i niezawodnego zasilania maszyn i urządzeń górniczych, zwłaszcza w warunkach istniejących zagrożeń naturalnych, w tym zagrożenia metanowego, temperaturowego, wodnego i pożarowego.

Trwałość

Parametrem ważnym zwłaszcza dla użytkowników akumulatorów litowych jest trwałość. Z upływem bowiem czasu zdolność do magazynowania i oddawania energii ulega pogorszeniu. Szybkość postępu tego procesu degradacji zależy od materiałów użytych do budowy akumulatorów, ich konstrukcji oraz sposobu, w jaki są użytkowane - szybszemu starzeniu się sprzyja m.in. przegrzewanie się akumulatora na skutek przeładowania.

Trwałość wyraża się liczbą cykli ładowania/rozładowania, a jako koniec życia akumulatora przyjmuje się zwykle spadek jego pojemności do 80% wartości nominalnej.

Trwałość akumulatora litowego zależy od szeregu czynników, między innymi od ubytków jonów elektroaktywnych, nadmiernego rozrostu powłok pasywacyjnych powstających na elektrodach, delaminacji materiału elektrod od folii oraz pękania elektrod pod wpływem naprężeń mechanicznych, temperatury pracy i przechowywania.

Jednym z warunków uzyskania odpowiedniej trwałości baterii jest zapewnienie odpowiedniej temperatury pracy i przechowywania ogniw. Zaleca się więc by baterie litowe były przechowywane i użytkowane w temperaturach w zakresie podanym przez producenta. Dla zwiększenia trwałości zaleca się przechowywanie nieużywanych akumulatorów litowych w chłodnym miejscu, najlepiej naładowanych tylko do 40% pojemności. Wyższe wartości temperatur trwale skracają żywotność ogniw, natomiast niższe negatywnie wpływają na uzyskiwaną pojemność.

Drugim ważnym warunkiem zapewnienia dużej trwałości ogniw jest stopień rozładowania i poziom naładowania. Im mniejszy jest bowiem stopień rozładowania (ang. depth of discharge, DoD), tym większa trwałość baterii. Najwydajniejszą opcją jest rozładowywanie baterii tylko o 20%. Takie rozwiązanie sprawia, że jeden pełny cykl (0-100%) osiągamy dopiero po 5 ładowaniach. Warto jednak zauważyć, że użytkowanie baterii w ten sposób nie jest łatwe, dlatego dobrym pomysłem jest ładowanie akumulatora po rozładowaniu go do 50%, co pozwala na 2-krotne zwiększenie trwałości baterii. Natomiast w przypadku poziomu naładowania ogniw (ang. state of charge, SoC) dobrym rozwiązaniem jest ładowanie ogniw do poziomu 80-85%. W ten sposób możemy uniknąć ostatniej fazy ładowania akumulatora, która negatywnie wpływa na znajdujący się wewnątrz ogniwa elektrolit. Ładując zatem baterię litową do 85% możemy nawet 3-krotnie wydłużyć jej trwałość.

Bezpieczeństwo

Akumulatory z grupy litowej łatwiej niż inne ulegają zapłonowi. Dochodzi do niego zazwyczaj w skutek zwarcia elektrod, co prowadzi do nadmiernego nagrzewania się akumulatora do temperatury przekraczającej wartość dopuszczalną przez producenta. Baterie litowo-jonowe bardzo negatywnie reagują na całkowite rozładowanie i mogą w ten sposób zostać trwale uszkodzone, zwłaszcza przy pozostawieniu ich rozładowanych przez dłuższy okres czasu. W takiej sytuacji napięcie baterii spada poniżej wartości dopuszczalnej zadeklarowanej przez producenta co prowadzi do uszkodzenia struktury krystalicznej ogniw. W efekcie dalsza eksploatacja staje się niemożliwa. Uszkodzenie baterii litowych może objawiać się utratą pojemności, wyrzutem gazu, zapłonem, a w skrajnych przypadkach eksplozją. Jest to szczególnie niebezpieczne w przypadku zagrożenia pożarowego i/lub wybuchowego, jakie występuje np. w podziemnych kopalniach, zwłaszcza metanowych.

Jednym z warunków bezpiecznego użytkowania baterii litowych jest kontrola napięcia oraz przerwanie rozładowania przy nadmiernym spadku poniżej wartości dopuszczanej przez producenta. Drugim ważnym warunkiem bezpiecznego użytkowania jest kontrola temperatury poszczególnych ogniw lub całego pakietu (akumulatora), aby nie zaistniała sytuacja, w której temperatura ogniw wzrosłaby powyżej wartości dopuszczanej przez producenta.

Efektywność energetyczna

Efektywne wykorzystanie energii ma na celu zmniejszenie ilości energii potrzebnej do dostarczania produktów i usług. Zgodnie z Ustawą [32] *...efektywność energetyczna to stosunek uzyskanej wielkości efektu użytkowego danego obiektu, urządzenia technicznego lub instalacji, w typowych warunkach ich użytkowania lub eksploatacji, do ilości zużytej energii przez ten obiekt,*

urządzenie techniczne lub instalację, i/albo w wyniku wykonanej usługi niezbędnej do uzyskania tego efektu [33].

Efektywność energetyczna zestawów ogniw (akumulatorów) powinna być więc taka, aby ogniwa mogły funkcjonować, jak najdłużej, jako niezawodne i stabilne źródła energii elektrycznej, charakteryzując się przy tym dużą trwałością oraz wysokim poziomem bezpieczeństwa. Realizuje się to stosując specjalizowane układy elektroniczne określane skrótem BMS (*Battery Management System*) [34].

W systemie BMS głównym blokiem funkcyjnym, który ma istotny wpływ na efektywne wykorzystanie energii w pakiecie ogniw (akumulatorze) jest ten odpowiadający za balansowanie ogniw, czyli niedopuszczenie do nadmiernego rozładowania albo przeładowania niektórych z nich, w porównaniu do pozostałych. Jest to niepożądane, ponieważ skraca żywotność akumulatora i może mieć wpływ na bezpieczeństwo jego użytkowania.

Jednym z warunków zapewnienia odpowiedniej efektywności energetycznej jest balansowanie ogniw. Balansowanie ogniw jest procesem mającym na celu wyrównanie stanu naładowania poszczególnych ogniw w akumulatorze, tak aby maksymalnie wykorzystać pojemności takiego pakietu. Zazwyczaj akumulatory tworzące baterię niewiele różnią się pojemnością, jednak różnica ta po kilkukrotnym cyklu ładowania-rozładowania bez balansowania staje się istotna i dochodzi do sytuacji, w której napięcie na jednym z ogniw spada poniżej bezpiecznej granicy eksploatacji. Dalsza eksploatacja jest niebezpieczna i może powodować uszkodzenie akumulatora. Maksymalna energia uzyskana z baterii w tym przypadku jest limitowana przez ogniwo o najmniejszej pojemności. Rozbieżność w ilości energii gromadzonej w ogniwach, w systemie akumulatorowym, ma bardzo duże znaczenie w odniesieniu do długości życia akumulatora. Bez więc systemu BMS, wartości napięć na poszczególnych ogniwach mogą bardzo różnić się względem siebie. Pojemność całego pakietu również może się szybko zmniejszać w trakcie pracy, co skutkuje utratą całkowitej zdolności systemu akumulatorowego do dalszej eksploatacji.

7. Badania porównawcze efektywności i bezpieczeństwa pracy układów baterii ogniwo litowych

Bezpieczne stosowanie akumulatorów litowo-żelazowo-fosforanowych (LiFePO₄) w układach zasilania urządzeń i/lub maszyn górniczych wymaga zapewnienia wymaganego poziomu bezpieczeństwa pracy. Dotyczy to w zasadzie wszystkich kopalń węgla, ale w szczególności kopalń zagrożonych pożarem lub wybuchem. W celu spełnienia warunków iskrobezpieczności ogniwo (wraz z systemem zarządzania baterią - BMS) muszą być one odizolowane od wpływu otoczenia, a więc umieszczone w obudowach przeciwwybuchowych z osłoną ognioszczelną. Pogarsza to znacznie rozpraszanie ciepła, wpływając w ten sposób na pogorszenie termicznych warunków pracy pakietów ogniwo (akumulatorów). Z tego względu ich praca bez układu BMS nie powinna mieć miejsca. W praktyce stosuje się różne rozwiązania BMS-ów, najczęściej z tzw. balansowaniem pasywnym. Zastosowanie jednak balansowania pasywnego w górnictwie nie jest wskazane ze względu na dodatkowe ciepło wytwarzane podczas eksploatacji. Jeśli chodzi o aktywne BMS-y, to zazwyczaj mają one dość skomplikowaną strukturę, a przez to są drogie.

Celem przeprowadzonych badań było sprawdzenie, przede wszystkim, poziomu zagrożenia (nagrzewanie się poszczególnych ogniwo akumulatora), zwłaszcza od wysokiej temperatury, dla wybranych ogniwo litowo-żelazowo-fosforanowych eksploatowanych zgodnie z zaleceniami producenta, ale użytkowanych w uciążliwych warunkach górniczych. Dotyczy to zwłaszcza, wydawałoby się, nieistotnych zagrożeń w przypadku, cyklicznych, niewielkich przeciążeń i rozładowań ogniwo. Badania wykonano zarówno dla pojedynczych ogniwo litowo-żelazowo-fosforanowych, jak i akumulatora z nich zbudowanego. Miały one ponadto na celu porównanie efektywności pracy przedmiotowych ogniwo z wybranymi układami balansowania pasywnego i aktywnego. Przeprowadzone badania wykonano w trzech etapach a mianowicie:

Etap I

W tym etapie badania przeprowadzono zarówno dla ogniwo o pojemności 10 Ah pracujących w temperaturze pokojowej (ok. 20°C) przy swobodnym oddawaniu ciepła do otoczenia, przy ustalonych stałych warunkach środowiskowych (temperatura i wilgotność), jak i przy ograniczonym chłodzeniu (pogorszony odpływ ciepła do otoczenia). Ponieważ w rzeczywistych warunkach pracy ogniwo mogą nie być ładowane równomiernie, temperatura była mierzona dla różnych wartości początkowego prądu obciążenia, niższych od jego standardowego poziomu rozładowania i wahała się od około 12% do około 50% tej wartości. Pomiarów rozpoczynano każdorazowo dla ogniwo w pełni naładowanych tj. od napięcia znamionowego U_n równego 3,2 V i trwały one aż do momentu obniżenia się napięcia do

minimalnej wartości $U_{\min}$ określonej przez producenta (równej 2,5 V). Badania wpływu temperatury otoczenia na pracę ogniwa wykonywano w komorze klimatycznej. Dla stałej wilgotności równej 75% zmieniano wartość temperatury otoczenia stopniowo w zakresie od +5°C do +60°C. Prąd obciążenia wynosił 3,8 A, co stanowi około 40% standardowej wartości prądu rozładowania. Wpływ pogorszonego chłodzenia ogniwa badano w warunkach symulowanych, umieszczając ogniwa w odpowiedniej izolacji termicznej a następnie lokując całość w obudowie styropianowej.

Zbadano również efektywność pracy ogniwa w przypadku jego całkowitego rozładowania się (praktycznie do około 9% wartości znamionowej). Sytuację taką często można spotkać w praktyce, gdy np. operator zapomina o odłączeniu obciążenia.

Etap II

W etapie II przeprowadzono badania wydajności akumulatora zbudowanego z 8 szeregowo połączonych ogniw litowo-żelazowo-fosforanowych (LiFePO_4) o pojemności 10 Ah, ale sterowanego aktywnym układem BMS metodą „bateria do ogniwa”. Układ ten został specjalnie opracowany w Instytucie KOMAG z przeznaczeniem do zastosowania w wybranym podwieszanym pojeździe górniczym. Główny nacisk położono na zróżnicowanie dwóch najważniejszych czynników decydujących o możliwości efektywnego wykorzystania wybranej baterii w praktyce, tj. stopnia nagrzewania się baterii podczas pracy oraz obniżania się wartości napięcia (mocy) w czasie. Przydatność opracowanej aktywnej struktury BMS wykorzystującej zasadę „bateria do ogniwa” porównano zarówno z aktywnym układem BMS opartym na metodzie „ogniwo do baterii”, jak i z powszechnie stosowanym w praktyce (szczególnie w przemyśle samochodowym) pasywnym rozwiązaniem BMS. Ze względu na przeznaczenie do pracy w kopalniach podziemnych badania przeprowadzono zarówno w temperaturze pokojowej (+20°C), ze swobodną wymianą ciepła do otoczenia, jak i w temperaturze podwyższonej (do +60°C) przy stałej wilgotności 75% i ograniczonej wymianie ciepła. Szczególną uwagę zwrócono na skuteczność balansowania badanego układu BMS podczas symulowanego nierównomiernego rozładowania wybranych ogniw (od 12% do około 40% wszystkich ogniw). Takie warunki pracy baterii są nieuniknione środowisku górniczym.

Etap III

W etapie III zostały przeprowadzone badania stanowiskowe aktywnego układu balansowania BMS metodą „baterii do ogniwa” przeznaczonego do zastosowania w wybranym podwieszanym ciągniku akumulatorowym PCA-1. Wybór rozwiązania układu BMS został podyktowany wynikami badań wykonanych w etapie II. W tym celu wykonano akumulator składający się z 15 ogniw o pojemności 10 Ah, spełniający wymagania do zastosowania

w podwieszanym ciągniku akumulatorowym PCA-1. Pomiarów rozpoczynano każdorazowo dla ogniw w pełni naładowanych tj. od napięcia znamionowego U_n równego 3,2 V i trwały one aż do obniżenia się napięcia do minimalnej wartości U_{min} określonej przez producenta (równiej 2,5 V). Badania wykonywano w temperaturze pokojowej (+20°C), ze swobodną wymianą ciepła do otoczenia. Aby sprawdzić skuteczność balansowania układu BMS symulowano nierównomierne rozładowanie wybranych ogniw (od 6% do około 20% liczby wszystkich ogniw), ponieważ takie warunki pracy akumulatora są nieuniknione w środowisku górniczym.

Etap IV

W etapie IV przeprowadzono badania stanowiskowe aktywnego układu balansowania BMS metodą „baterii do ogniwa” z wykorzystaniem akumulatora eksploatowanego w podwieszanym ciągniku akumulatorowym PCA-1. Eksploatowany akumulator składał się z 15 szeregowo połączonych ogniw litowo-żelazowo-fosforanowych ($LiFePO_4$), ale o znacznie większej pojemności równiej 120 Ah. Badania te miały na celu ocenę efektywności pracy układu BMS przy dotychczasowo przyjętej w badaniach, ale zbyt małej w stosunku do pojemności eksploatowanego akumulatora wartości prądu balansowania. Pomiarów rozpoczynano każdorazowo dla ogniw w pełni naładowanych tj. od napięcia znamionowego U_n równego 3,2 V i trwały one aż do obniżenia się napięcia do minimalnej wartości U_{min} określonej przez producenta (równiej 2,5 V). Badania wykonywano w temperaturze pokojowej (+21°C), ze swobodną wymianą ciepła do otoczenia. Aby sprawdzić skuteczność balansowania układu BMS symulowano rozładowanie całego akumulatora prądem o wartości 53 A (około 45% wartości standardowego rozładowania), bez podłączonego i z podłączonym aktywnym systemem BMS.

Zakres badań

Do badań wykorzystano trzy układy (systemy) BMS. Dwa z nich, aktywne, zostały zaprojektowane i wykonane w ITG KOMAG, natomiast trzeci, pasywny system BMS ORION został zakupiony.

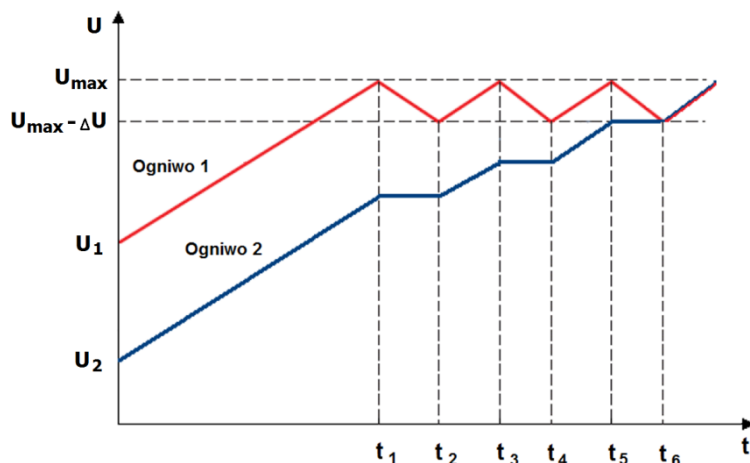
System BMS z balansowaniem pasywnym

Działanie tego systemu opiera się na rozpraszaniu na ciepło nadmiarowej energii za pomocą rezystorów (rys. 5.5). 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. Jeżeli wartość napięcia któregośkolwiek z ogniw znacząco przekroczy napięcie pozostałych, zostaje ono zwarte, przez odpowiedni wyłącznik. Skutkuje to rozładowaniem danego 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. Równocześnie, kontrolowane są on-line wartości napięć wszystkich pozostałych ogniw. Przykład charakterystyki balansowania pasywnego przedstawiono na rysunku 7.1.

Dane techniczne:

- Ilość ogniw – max 16.
- Prąd maksymalny – 350 mA.
- Max. napięcie wyłączenia – 3,8 V.
- Min. napięcie wyłączenia – 2,0 V.



Rys. 7.1. Przykład charakterystyki balansowania pasywnego

System BMS z balansowaniem aktywnym metodą ogniwo do baterii

Pierwszy z dwóch aktywnych systemów BMS wykorzystujący metodę ogniwo do baterii wykonano w ITG KOMAG. Jest on szczegółowo opisany w artykule [35].

Balansowanie ogniw w tym systemie BMS polega na przenoszeniu energii z ogniw najbardziej naładowanych do całej baterii, poprzez wyrównywanie ładunków na poszczególnych ogniwach akumulatora. W celu zapewnienia efektywnego transferu energii zastosowano specjalnie zaprojektowane i wykonane moduły, które zostały następnie zamontowane na poszczególnych ogniwach (rys. 7.2).

Energia w tym rozwiązaniu, odbierana jest z pojedynczych nadmiernie naładowanych ogniw, a następnie jest przekazywana do obciążenia, podczas pracy baterii w trybie rozładowania i/lub zwracana do całego pakietu, podczas jej pracy w trybie ładowania.



Rys. 7.2. System BMS zainstalowany na pakiecie ogniw

System BMS z balansowaniem aktywnym metodą bateria do ogniwa

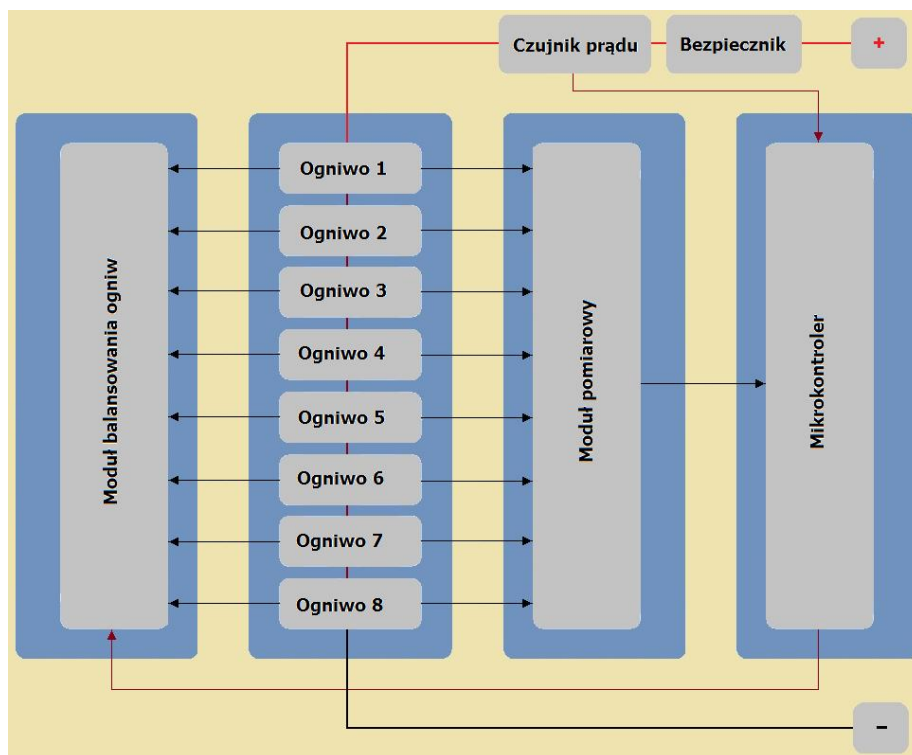
W drugim opracowanym w ITG KOMAG rozwiązaniu aktywnego systemu BMS, wykorzystano metodę baterii do ogniwa. System składa się z dwóch modułów: pomiarowego i balansowania ogniw.

W module pomiarowym wartości napięć poszczególnych ogniw są monitorowane w mikrokontrolerze za pośrednictwem przetworników analogowo-cyfrowych, na których wejście, podłączone są poszczególne ogniwa. Dodatkowo wykonywane są pomiary temperatury poszczególnych ogniw za pośrednictwem przetwornika analogowo-cyfrowego mikrokontrolera.

W przypadku wystąpienia przeciążenia, przepięcia, zbyt niskiego napięcia albo przegrzania i/lub wystąpienia każdej innej niebezpiecznej sytuacji, akumulator zostaje wyłączony. Utrzymywanie niebezpiecznej sytuacji jest zarówno niepożądane, jak i niebezpieczne. Skraca bowiem żywotność akumulatora i może mieć wpływ na bezpieczeństwo jego użytkowania.

Moduł pomiarowy realizuje również funkcję kontroli poziomu naładowania akumulatora. Wartość ta obliczana jest na podstawie danych z pomiaru wartości napięcia na poszczególnych ogniwach akumulatora.

Na rysunku 7.3 został przedstawiony przykład realizacji tego typu aktywnego systemu BMS zarządzającego pracą akumulatora.



Rys. 7.3. Przykład realizacji systemu zarządzania pracą akumulatora

Balansowanie w metodzie bateria do ogniwa polega na przenoszeniu energii z całej baterii do najsłabszego ogniwa. Proces balansowania wyrównuje stan naładowania poszczególnych ogniw w akumulatorze i ma na celu zmaksymalizowanie wykorzystania jego pojemności oraz przedłużenie żywotności. Zazwyczaj ogniwa tworzące akumulator niewiele różnią się pojemnością, jednak różnica ta po kilkukrotnym cyklu ładowania-rozładowania bez balansowania staje się istotna i może doprowadzić do sytuacji, w której napięcie na jednym z ogniw spada poniżej bezpiecznej granicy eksploatacji zalecanej przez producenta. Dalsza eksploatacja może być niebezpieczna i doprowadzić do uszkodzenia akumulatora. Taka sytuacja powoduje, że maksymalna energia uzyskana z akumulatora jest ograniczona przez ogniwo o najmniejszej pojemności.

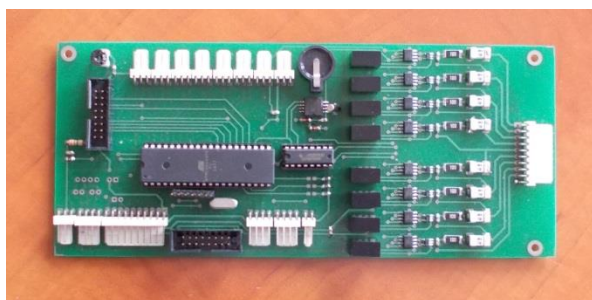
Rozbieżność w ilości energii gromadzonej w ogniwach, w systemie akumulatorowym, ma bardzo duże znaczenie w odniesieniu do jego długości życia. Bez bowiem systemu BMS, wartości napięcia na pojedynczych ogniwach mogą po pewnym czasie bardzo różnić się względem siebie. Pojemność całego akumulatora również może się szybko zmniejszać w trakcie swojej pracy, co

skutkuje utratą całkowitej zdolności systemu akumulatorowego do dalszej pracy [36-39].

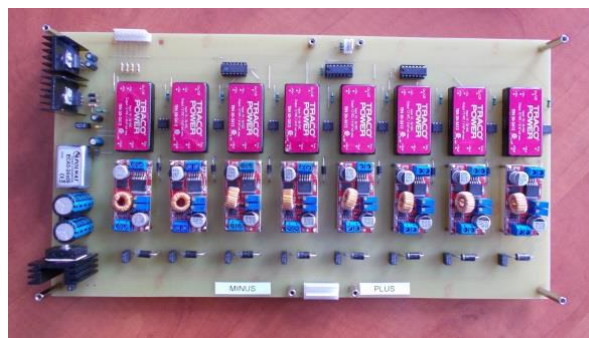
System BMS baterii składa się z:

- modułu pomiarowego i sterującego (rys. 7.4) – służących do pomiaru napięć podłączonych ogniw oraz sterowania pracą całego systemu BMS a także nadzoru parametrów pracy baterii,
- modułu balansera (rys. 7.5) – przyporządkowanego do każdego ogniwa, umożliwiającego fizyczną realizację procesu balansowania, czyli wyrównywania poziomów energii pomiędzy ogniwami poprzez jej przekazywanie.

Dane pomiarowe odczytywane i rejestrowane są za pomocą karty SD.



Rys. 7.4. Moduł pomiarowy i sterujący



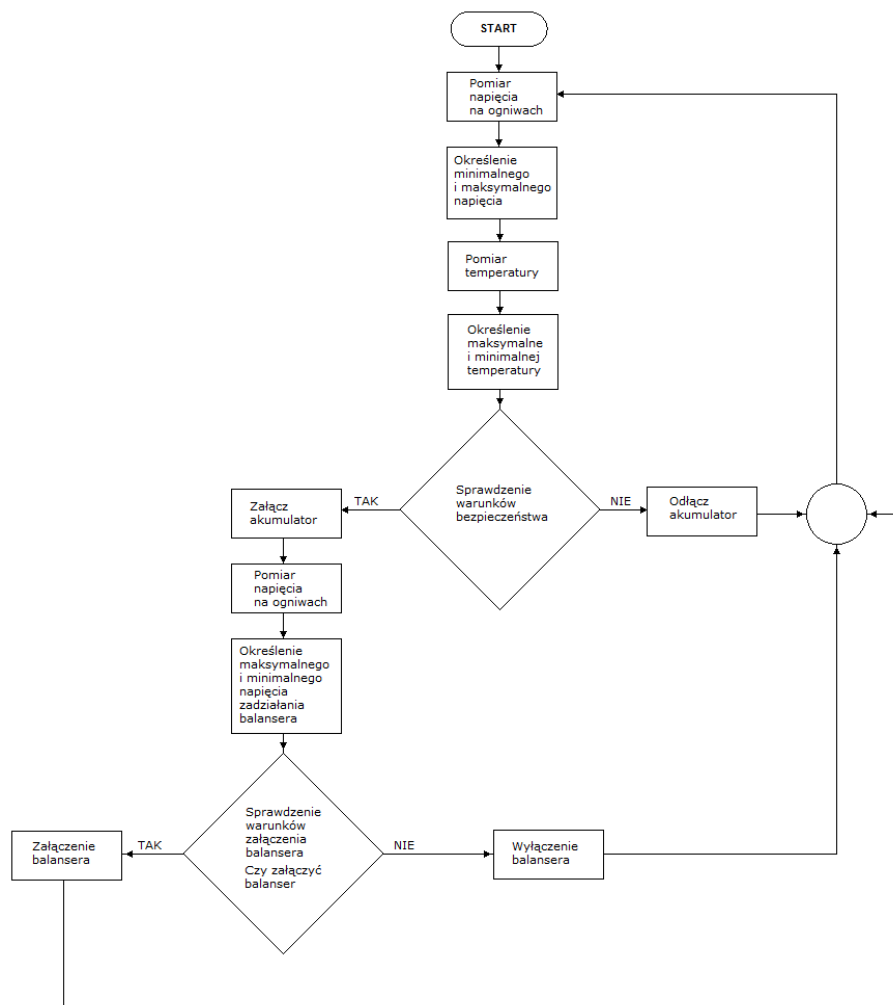
Rys. 7.5. Moduł balansera

Algorytm aktywnego balansowania

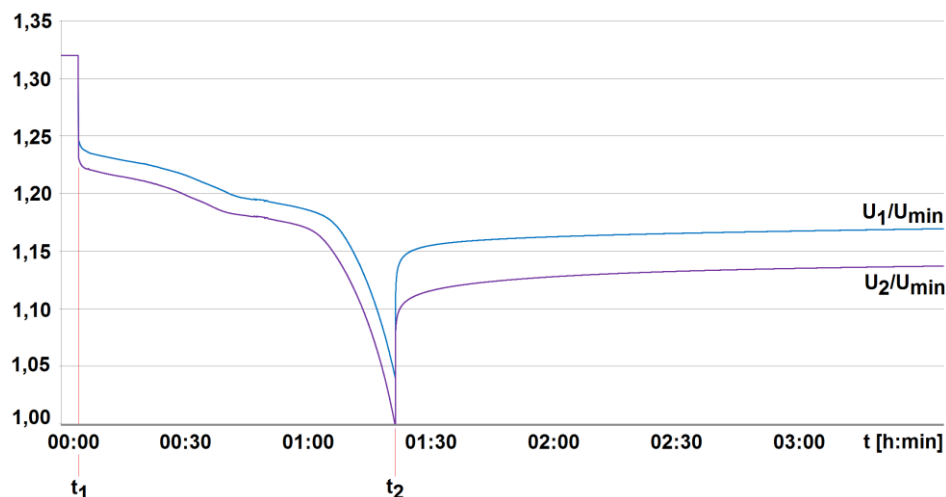
Na rysunku 7.6 przedstawiono opracowany algorytm aktywnego balansowania, który został wprowadzony do programu źródłowego modułu pomiarowego BMS. Wnioski z przeprowadzonych badań, umożliwiły m.in.

uzupełnienie algorytmu o szczegółowe warunki wyboru ogniw do balansowania [40].

Na rysunku 7.7 przedstawiono charakterystykę napięciową rozładowania ogniw, która uwidacznia problem jaki stoi przed algorytmem wyboru ogniw do balansowania. Problemem tym jest mała zmiana wartości napięcia na danym ogniwie podczas jego pracy w zakresie między 10% a 90% czasu trwania rozładowania ogniwa. Dla stałej bowiem wartości prądu rozładowania (obciążenia) można wartości czasu rozładowania przeliczyć bezpośrednio na procentowy ładunek zgromadzony w ogniwie.



Rys. 7.6. Algorytm działania aktywnego systemu BMS



Rys. 7.7. Charakterystyka napięciowa rozładowania ogniw LiFePO_4 .
Przebiegi napięć $U_1/U_{\min}$ i $U_2/U_{\min}$ w czasie dla dwóch ogniw obciążonych szeregowo nieobciążonej baterii bez systemu BMS (temperatura pokojowa $T_0 = 20^\circ\text{C}$, chłodzenie swobodne), t_1 , t_2 - moment załączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, $U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V

Należy zauważyć, że przez większość czasu napięcie na ogniwach zmienia się w bardzo małym zakresie. Niewielkie więc błędy układów pomiarowych napięcia poszczególnych modułów mogłyby spowodować nieprawidłową identyfikację stanu naładowania któregoś ogniwa, co w skrajnych przypadkach mogłoby doprowadzić do nadmiernego rozładowania któregoś ogniwa baterii. Takie działanie algorytmu mogłoby spowodować uszkodzenie ogniwa, a co zatem idzie całej baterii.

7.1. Badania wpływu prądu rozładowania na rozkład temperatury i bezpieczeństwo pracy ogniwa litowego

Głównym czynnikiem mającym wpływ na czas trwania eksploatacji akumulatorów zbudowanych z ogniw litowych jest temperatura. Zapewnienie optymalnej wartości temperatury roboczej (zwykle około 20°C) to najważniejszy warunek, jaki należy spełnić, aby zapewnić wystarczająco długą żywotność ogniw z których zbudowany jest akumulator. Zbyt bowiem wysoka temperatura ogniwa skutkuje przyspieszonym jego starzeniem się, natomiast zbyt niska sprawia, że ogniwo nie jest w stanie pracować z wymaganą wydajnością, zaś wymuszenie takiej wydajności wiąże się z ryzykiem jego uszkodzenia. Oznacza to, że w każdych warunkach środowiskowych, z wyjątkiem najbardziej umiarkowanych, wymagane jest utrzymanie optymalnej wartości temperatury roboczej ogniw i zbudowanych z nich akumulatorów.

Uszkodzenia akumulatorów litowych mogą prowadzić do utraty pojemności, emisji gazów, zapłonu, a w skrajnych przypadkach – do eksplozji. W warunkach pracy w kopalniach węgla kamiennego, gdzie występuje zagrożenie wybuchem pyłu węglowego i metanu, stanowi to szczególne niebezpieczeństwo. Do takich zdarzeń najczęściej dochodzi w wyniku zwarcia elektrod, powodującego nagrzewanie się ogniwa do temperatur przekraczających wartości dopuszczalne przez producenta. Zwarcia wewnętrzne mogą być skutkiem defektów konstrukcyjnych lub produkcyjnych, takich jak zadziory na foliach elektrodowych, perforacje w materiale elektrod czy obecność zanieczyszczeń.

Ogniwa litowe

Do badań wykorzystano zakupione ogniwa litowe typu Headway LFP38120(S) (rys. 7.8) o napięciu znamionowym 3,2 V i pojemności 10 Ah. Szczegółowe dane techniczne przedmiotowych ogniw są zamieszczone na stronie producenta [41].



Rys. 7.8. Ogniwo Headway LFP38120(S) 10 Ah

Dane techniczne:

- napięcie: 3,2 V,
- pojemność: 10 Ah,
- rezystancja wewnętrzna: $< 6 \text{ m}\Omega$,
- napięcie ładowania: $3,65 \text{ V} \pm 0,05 \text{ V}$,
- gęstość energii: 105 Wh/kg,
- technologia: litowo-żelazowo-fosforanowa (LiFePO_4),
- napięcie maksymalnego rozładowania: 2,0 V-2,5 V,
- zakres temperatur pracy:
 - ładowanie: $0 - 45^\circ\text{C}$,
 - rozładowanie: $-20 - 65^\circ\text{C}$,
- trwałość: pow. 2000 cykli (80% pojemności przy ładowaniu prądem 1C).

Badania rozkładu temperatury na obudowie ogniwa litowego

Problemy zapewnienia odpowiednich racjonalnych temperatur akumulatora zbudowanego z ogniw litowych są niezwykle istotne i wpływają na ich trwałość oraz parametry eksploatacyjne. Trwałość zależy bowiem od szeregu czynników, w tym w pierwszej kolejności od temperatury pracy oraz zmiany jej wartości podczas trwania procesu rozładowania (obciążenia). Konkretnie parametry graniczne temperatury pracy zależą od technologii wykonania danego wariantu ogniwa [42].

Zgodnie z zasadami rządzącymi reakcjami chemicznymi jest wiadomym, że zarówno wydajność prądowa, jak i efektywny ładunek ogniwa litowego maleją wraz ze spadkiem wartości temperatury. Natomiast używanie ogniwa litowego powyżej temperatury optymalnej nie jest zalecane ze względów bezpieczeństwa, szczególnie w sytuacji, kiedy akumulator składa się z setek ogniw, a ich chłodzenie jest ograniczone i niejednakowe. Już bowiem nieco powyżej temperatury granicznej danego typu ogniwa następuje znaczące odkładanie się metalicznego litu. Jeżeli zaś temperatura wrośnie znacząco powyżej wartości granicznej to może zostać naruszona warstwa pasywna rozdzielająca elektrodę ujemną i elektrolit. Prowadzi to do silnie egzotermicznej reakcji grafitu z elektrolitem i może doprowadzić do wzrostu ciśnienia i puchnięcia ogniwa lub zrzutu gazu przez zawór bezpieczeństwa. Jeśli zatem w ogniwie znajdzie się wolny tlen np. z wywołanej ciepłem dekompozycji matrycy katodowej to może nastąpić zapłon lub/i wybuch uszkodzonego ogniwa.

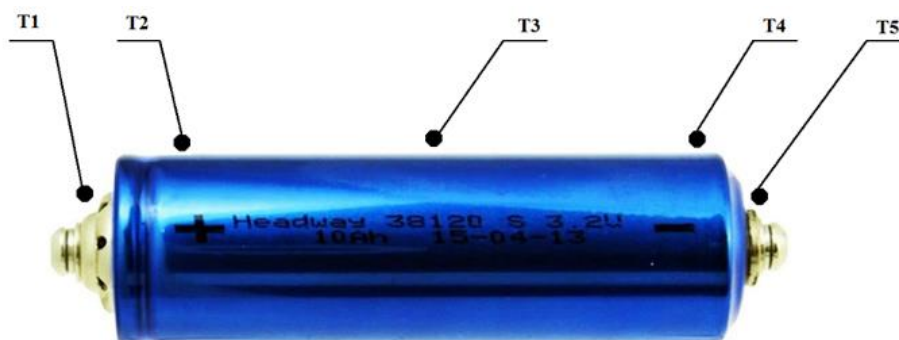
Czujnik temperatury AD22100

Do badań wykorzystano czujniki AD22100 firmy Analog Devices o zakresie od -50°C do $+150^{\circ}\text{C}$. Nie wymagają one, rozbudowanych urządzeń zewnętrznych ani kalibracji. Szczegółowe dane techniczne zastosowanych czujników podano na stronie producenta [43].

Rozkład czujników

W celu przeprowadzenia pomiarów na obudowie ogniwa rozmieszczono pięć czujników temperatury. Natomiast szósty czujnik został umieszczony obok badanego ogniwa i służył do pomiaru temperatury otoczenia jako odniesienia. Płaszczyzna czujników jest równoległa do obudowy ogniwa, a sposób rozmieszczenia czujników przedstawiono na rysunku 7.9. Wybór miejsca był podyktowany równomiernością umiejscowienia czujników. Najwyższe wartości temperatury pomierzono czujnikiem T1. Wybór miejsca lokalizacji czujnika wynikał z konstrukcji cylindrycznej ogniwa, w której obudowa jest wykonana z metalu i połączona z elektrodą dodatnią. Taka konstrukcja ogniwa powoduje, że najwyższa temperatura jest na elektrodzie dodatniej, ponieważ podczas nagrzewania się ogniwa ta część lepiej odprowadza ciepło (działa jak radiator).

Natomiast elektroda ujemna jest izolowana, co powoduje, że przewodzenie ciepła jest znacznie utrudnione. Podobny schemat badań przyjęto do oceny nagrzewania się akumulatora w układzie bez i z balansowaniem.



Rys. 7.9. Rozmieszczenie czujników temperatury na badanym ogniwie

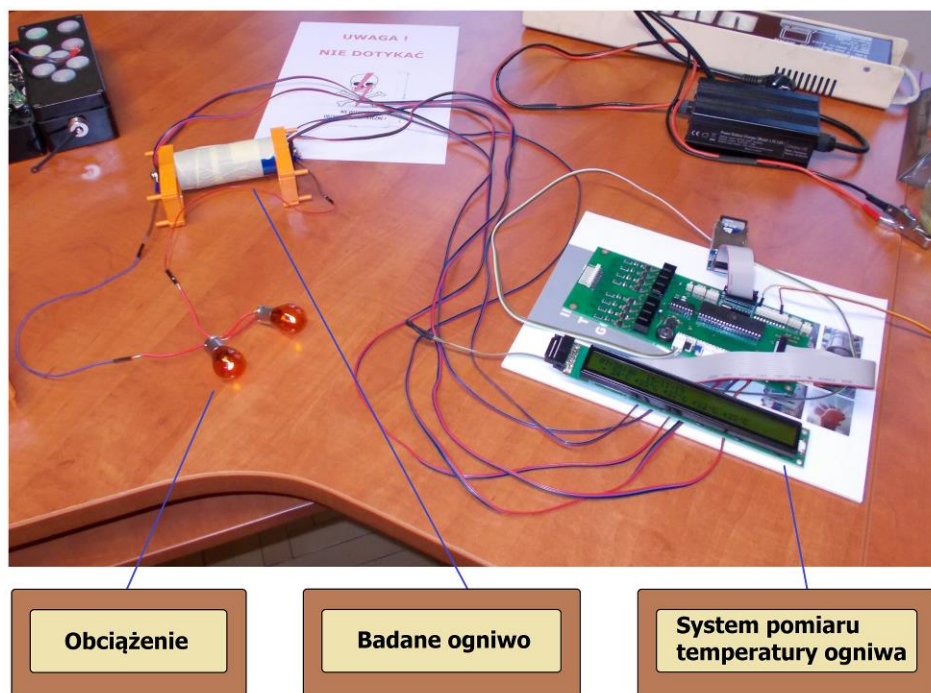
T1 ÷ T5 – pomiar temperatury ogniwa

Zakres badań

Badania wykonano w czterech odpowiednich etapach, podczas których mierzono i rejestrowano wartości temperatury na powierzchni ogniwa litowego podczas rozładowania (aż do minimalnych wartości granicznych podanych przez producenta) oraz zmianę wartości w tym czasie napięcia na ogniwie.

Etap pierwszy - badania stanowiskowe

Założono, że w rzeczywistych warunkach pracy ogniwa nie są jednakowo obciążone, a prąd obciążenia zmienia się w zależności od charakteru pracy (rys. 7.10). Podczas badania rejestrowane były zmiany wartości temperatury w zależności od prądu obciążenia. Badaniu poddawano ogniwa w pełni naładowane (do wartości znamionowej). Do zacisków danego ogniwa zostały podłączane obciążenia wymuszające prąd o różnych wartościach tj.: 1,2 A, 1,7 A, 2,5 A, 3,2 A, 3,8 A oraz 4,9 A (rys. 7.17).

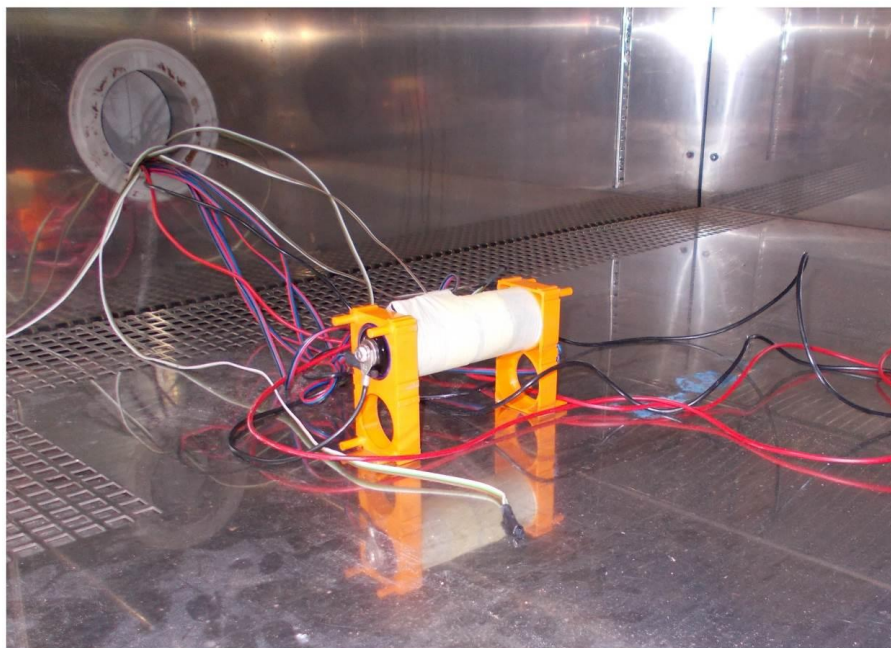


Rys. 7.10. Stanowisko do badania rozkładu temperatury na obudowie ogniwa litowego

Etap drugi - badania w komorze klimatycznej

Zbadano przypadek, w którym ogniwo zostało naładowane w 100% i umieszczone w komorze klimatycznej tak, aby idealnie odwzorować określone dla miejsc użytkowania warunki i zasymulować ich wpływ na temperaturę badanego ogniwa (rys. 7.11). Należy podkreślić, że badania stanowiskowe wpływu określonych warunków pracy pozwalają ustrzec się nie tylko przed niepotrzebnymi kosztami fazy projektowej, ale również wymiernymi stratami z powodu ewentualnych uszkodzeń lub nieprawidłowej pracy zastosowanych w praktyce ogniw.

Badania wykonano przy stałej wilgotności 75%, różnych temperaturach tj.: +5°C, +20°C, +45°C, +60°C i jednakowym prądzie obciążenia o wartości 3,8 A.



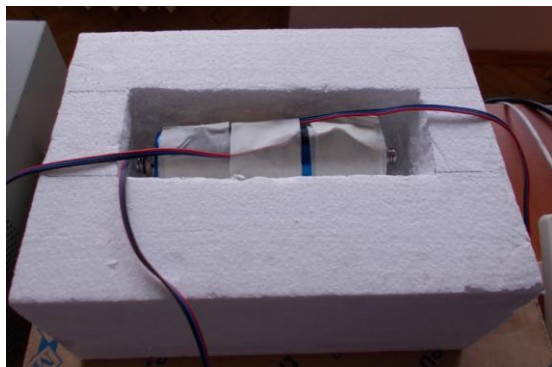
Rys. 7.11. Stanowisko do badania rozkładu temperatury na obudowie ogniwa litowego w komorze klimatycznej

Etap trzeci i czwarty - badania termiczne

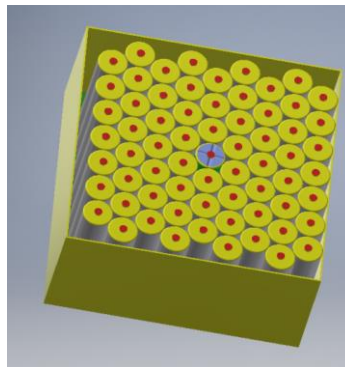
W obu etapach, badania zostały wykonane dla ogniw znajdujących się w osłonie izolacyjnej zbudowanej ze styropianu, tak aby zapewnić stałe warunki termiczne badanego ogniwa (rys. 7.12). Przyjęto bowiem do zbadania taki przypadek, gdy ogniwa w dużej ilości (np. 200 szt.) zostaną umieszczone w szczelnej obudowie. Wówczas wymiana ciepła z otoczeniem jest znacznie utrudniona. Najbardziej narażone termicznie będą te ogniwa, które są umiejscowione centralnie, wśród pozostałych ogniw, i ogrzewane są ciepłem pochodzącym od ogniw położonych wokół nich (rys. 7.13).

W etapie trzecim zbadano przypadek pracy, w którym ogniwo zostanie rozładowane do minimalnej wartości podanej przez producenta. W czwartym zaś etapie zasymulowano sytuację, w której obsługa zapomniiała odłączyć akumulator od układu zasilanego. Powoduje to, że z całego akumulatora, jak również z pojedynczego ogniwa jest cały czas pobierana energia. Występuje wówczas sytuacja, w której ogniwo rozładowywane jest poniżej napięcia minimalnego podanego przez producenta. Takie zdarzenie może spowodować sytuację zagrażającą prawidłowemu funkcjonowaniu ogniwa. W badaniu ogniwo zostało rozładowane do napięcia 300 mV.

Badania wykonano przy obciążeniu ogniwa prądami o wartości 3,8 A.



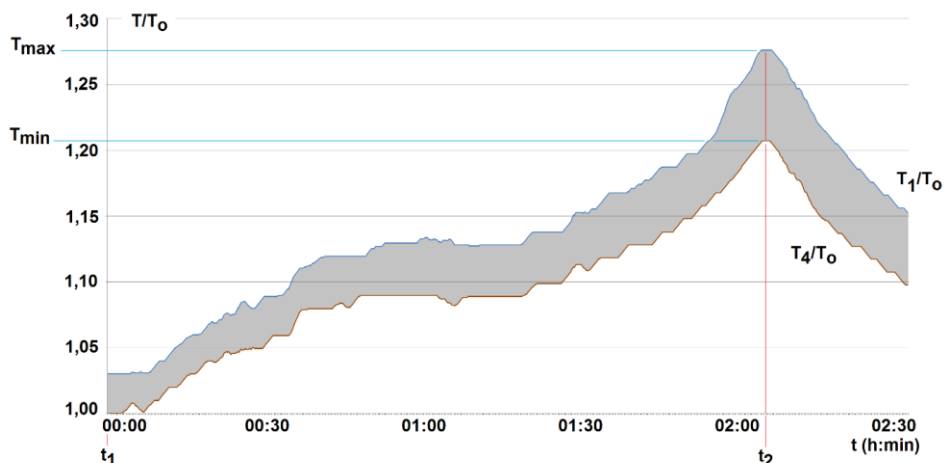
Rys. 7.12. Stanowisko do badania rozkładu temperatury na obudowie ogniwa litowego w komorze zbudowanej ze styropianu



Rys. 7.13. Rysunek poglądowy rozmieszczenia ogniw z ograniczonym chłodzeniem

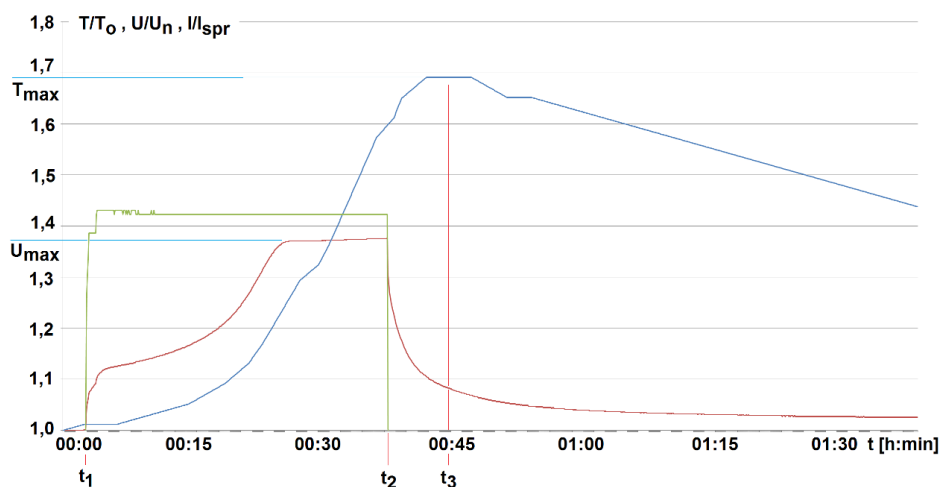
Wyniki badań

Przeprowadzone badania wykazały, że temperatura wszystkich ogniw w każdym teście była najwyższa w punkcie T_1 (blisko bieguna dodatniego - rysunek 7.9). W pozostałych punktach obudowy nie wykazywała ona znaczących odchyłeń i była nieco niższa (średnio o około 10%) – rys. 7.14. W związku z powyższym punkt pomiaru T_1 uznano za najbardziej krytyczny z punktu widzenia kontroli wydajności ogniwa. Do temperatury więc w tym punkcie odnoszą się wszystkie prezentowane wyniki pomiarów. Przed rozpoczęciem badań sprawdzono zachowanie ogniw podczas ich nieznacznego przeładowania, które bardzo często występuje w praktyce. W tym celu zastosowano nieco wyższą wartość napięcia ładowania (4,38 V), o około 20% niż zalecane przez producenta (3,65 V), dla mniejszych jednak (o około 10%) wartości prądu w porównaniu do standardowych ładowań zalecanych przez producenta, tak aby nie przekroczyć temperatury dopuszczalnej [44]. Stwierdzono, że zastosowany prąd około 4,5 A utrzymuje praktycznie stałą wartość w całym procesie ładowania. Jest to niezależne od zmiennej wartości napięcia ładowania w czasie, w tym jego stabilizacji po około 25 min (rys. 7.15). Przebiegi napięcia ładowania i temperatury w punkcie T_1 , pokazane na tym rysunku wykazują, że temperatura rośnie wykładniczo w zależności od pojemności cieplnej ogniwa i warunków środowiskowych. Ze względu na występującą termiczną stałą czasową ogniwa, przez pewien czas po wyłączeniu ładowania temperatura wzrasta. Dlatego po około 10 min od wyłączenia napięcia temperatura obudowy ogniwa przekracza temperaturę otoczenia o około 70%. Tym samym nawet krótkotrwałe, niewielkie przeładowanie, zwłaszcza powtarzające się w czasie, może stanowić poważne zagrożenie dla pracy akumulatorów i urządzeń z nich zasilanych.



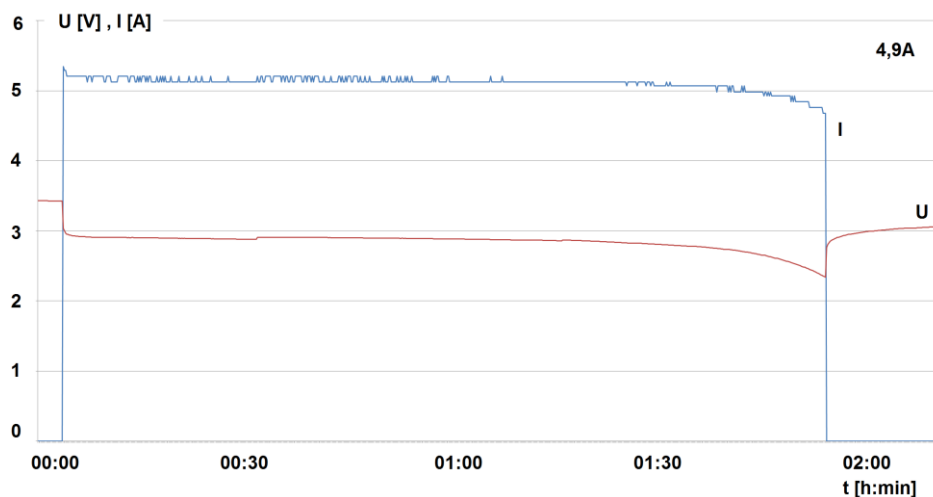
Rys. 7.14. Zmiany temperatury na obudowie ogniwa w czasie, w różnych punktach pomiarowych ($T_1 \dots T_5$) przy rozładowaniu prądem 4,9 A (około 50% wartości standardowego rozładowania), temperatura pokojowa $T_0 = 21^\circ\text{C}$

Może to doprowadzić do wybuchu baterii i w efekcie do pożaru w kopalniach, zwłaszcza metanowych. Aby zweryfikować wpływ prądu obciążenia na przyrost temperatury nagrzewania się ogniwa w punkcie T_1 , przeprowadzono odpowiednie badania dla różnych stałych wartości prądów obciążenia w temperaturze pokojowej (około 22°C) przy zapewnieniu swobodnego chłodzenia (rys. 7.17).



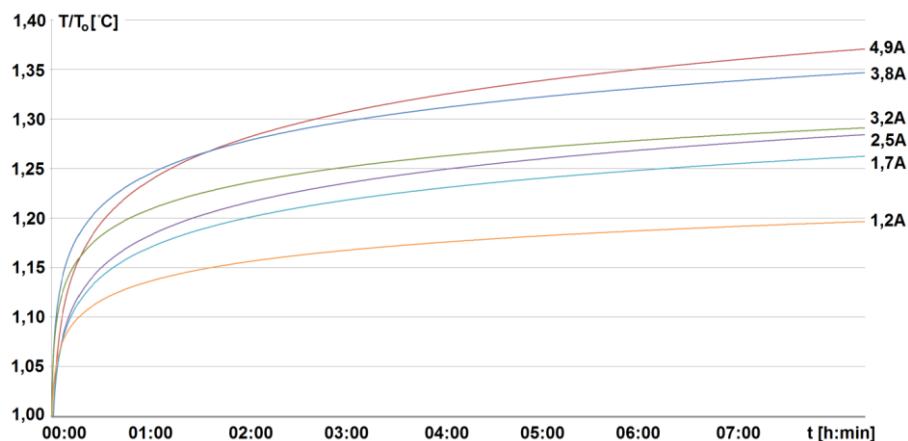
Rys. 7.15. Zmiana temperatury (czujnik T_1 - linia niebieska), prądu obciążenia (linia zielona) i napięcia ogniwa (LiFePO_4) U / U_n (linia czerwona) w funkcji czasu podczas przeładowania (napięcie U_{max} powyżej 37%) (znamionowe $U_n = 3,2\text{ V}$, temperatura otoczenia $T_0 = 22^\circ\text{C}$, t_1, t_2 - czas załączenia i wyłączenia ładowarki, t_3 - czas maksymalnej temperatury $T_{\text{max}} = 37^\circ\text{C}$)

Oczywistym jest, że w rzeczywistych warunkach pracy ogniwa mogą być obciążane różnymi wartościami prądu w zależności od charakteru pracy. W związku z tym zmienność w czasie wartości napięcia ogniwa i przebiegu nagrzewania może mieć bardzo różny charakter podczas pracy. Ogniwa były w pełni naładowane, a testy kontynuowano do momentu, gdy napięcie spadło do wartości minimalnej (2,5 V). Podczas ładowania prąd był praktycznie stały w czasie (niezależnie od ustawionych wartości) i zaczął zmniejszać swoją wartość, gdy napięcie obniżyło się do wartości bliskiej minimum ($U_{\min} = 2,5 \text{ V}$). Dla prądu obciążenia równego 4,9 A pokazano to na przykład na rysunku 7.16.

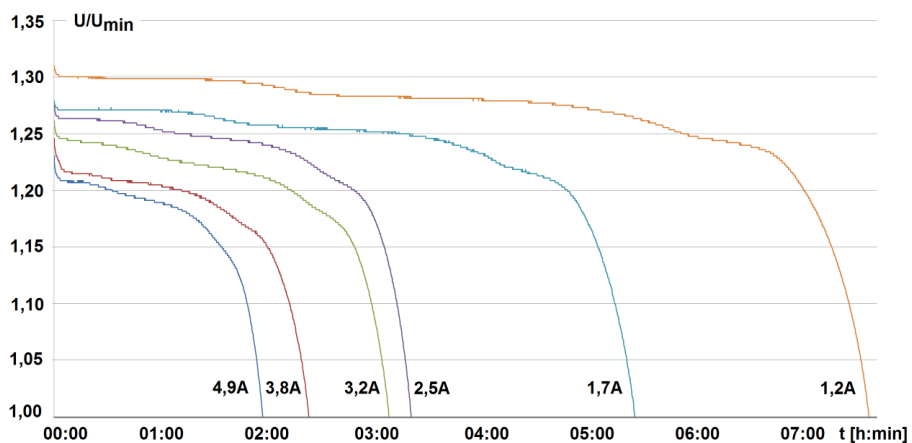


Rys. 7.16. Przebiegi prądu i napięcia w czasie przy obciążeniu prądem 4,9 A w warunkach swobodnej wymiany ciepła do otoczenia ($T_o = 22^\circ\text{C}$)

Pomierzone przebiegi zmiany napięcia ogniw oraz temperatury w czasie przedstawiono na rysunkach 7.17 i 7.18.



Rys. 7.17. Przebiegi temperatury ogniwa w punkcie T_1 odniesione do temperatury otoczenia podczas rozładowania (do minimalnej wartości napięcia $U_{\min}$ równej 2,5 V) dla różnych prądów obciążenia w warunkach swobodnej wymiany ciepła do otoczenia ($T_0 = 22^\circ\text{C}$)



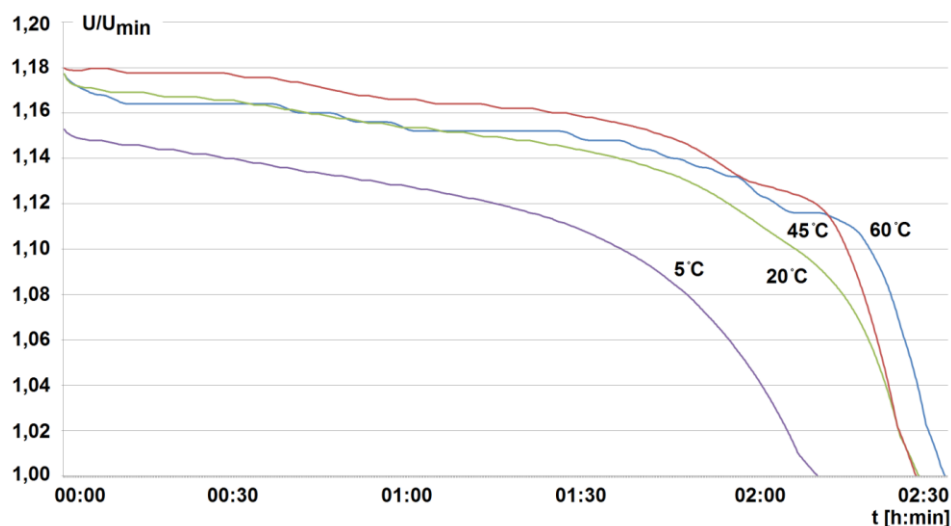
Rys. 7.18. Zmiana napięcia ogniwa U w czasie w funkcji prądu obciążenia (1,2A - 4,9A) przy stałej temperaturze otoczenia (około 22°C)

Zależność czasu rozładowania ogniwa od wartości prądu

Tabela 1

Lp.	Wartość prądu rozładowania [A]	Czas rozładowania ogniwa [h:min]
1	1,2	7:42
2	1,7	5:32
3	2,5	3:22
4	3,2	3:10
5	3,8	2:24
6	4,9	1:58

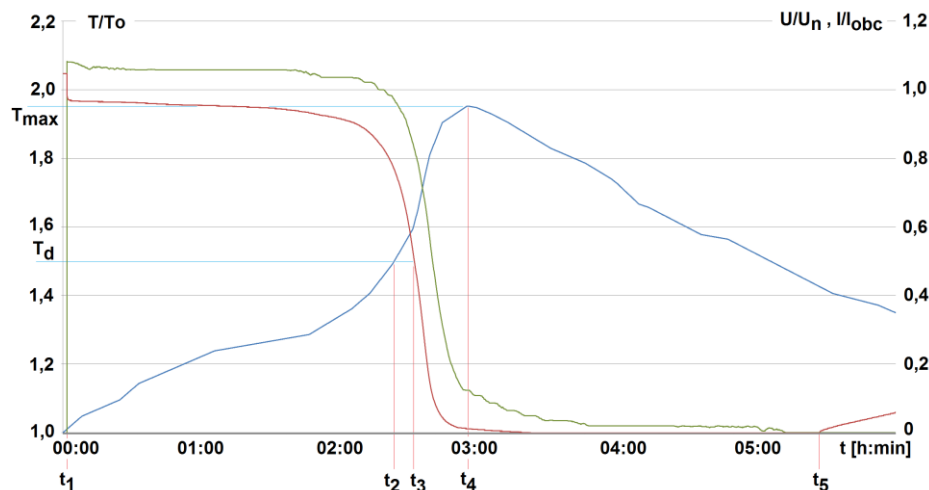
Dla prądu rozładowania (obciążenia) nie przekraczającego 50% wartości standardowej testowanych ogniw (10 A) ogniwa nagrzewają się stosunkowo mało. Wartość temperatury dla największego prądu rozładowania równego 4,9 A osiągnęła około 31°C, gdy napięcie spadło do minimalnej wartości rozładowania 2,5 V (rys. 7.17). Stwierdzono jednak, że czas do dopuszczalnego maksymalnego rozładowania (minimalna wartość napięcia na ogniu zgodna z podaną przez producenta) jest liniowo zależny od wartości prądu, co można porównać w Tabeli 1 oraz z rys. 7.18. Badając zachowanie ogniw w komorze klimatycznej ze stałą, zadaną temperaturą (+5°C, +60°C) i wilgotnością (około 75%) oraz przy stałej wartości prądu rozładowania (około 40% jej wartości standardowej) stwierdzono, że temperatura nieznacznie wzrasta powyżej temperatury otoczenia. Natomiast czas trwania obniżania się napięcia do wartości minimalnej praktycznie nie zmienia się w zakresie temperatur powyżej temperatury pokojowej (+20°C, +60°C). Dla niższej jednak wartości temperatury rozładowywanie ogniw przebiega szybciej.



Rys. 7.19. Przebieg zmiany w czasie względnej wartości napięcia ogniwa podczas obciążenia prądem stałym o natężeniu 3,8 A

Z przeprowadzonych badań wynika, że podwyższenie wartości temperatury ogniwa (do ok. +60°C) praktycznie nie wpływa na czas jej rozładowania. Dużo bardziej niekorzystna natomiast jest obniżona temperatura obudowy (+5°C), wskutek czego czas rozładowania do wartości minimalnej napięcia skraca się (o ok. 10%) (por. rys. 7.19). W przypadku głębokiego rozładowania widoczny wzrost temperatury ogniwa ma miejsce w momencie, gdy napięcie zaczyna znacznie się obniżać. Następnie, pomimo spadku wartości prądu (i napięcia), temperatura nadal rośnie, osiągając maksimum (około +43°C) po pewnym czasie (t_4) ze względu na bezwładność cieplną badanych

ogniwa. Napięcie ogniwa zaczyna się odbudowywać natychmiast po wyłączeniu obciążenia (t_5 — patrz rysunek 7.20). Należy w tym miejscu zauważyć, że obniżenie temperatury od maksymalnej do wartości pokojowej zajmuje stosunkowo dużo czasu (kilka godzin). W efekcie obudowa ogniwa z każdym kolejnym doładowaniem wykazuje coraz wyższą temperaturę. W pewnych warunkach eksploatacyjnych może to stanowić poważne zagrożenie.



Rys. 7.20. Przebiegi napięcia (linia czerwona), prądu (linia zielona) i wartości temperatury (linia niebieska, T_1) ogniwa w czasie podczas tzw. głębokiego rozładowania (do około 10% wartości napięcia znamionowego) dla stałego prądu obciążenia wynoszącego 3,8 A (temperatura pokojowa $T_0 = 22^\circ\text{C}$, chłodzenie swobodne; t_1, t_5 - moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_2 - temperatura T_d (33°C) przy minimalnej wartości napięcia zarejestrowana w t_3 ; t_4 - czas maksymalnej temperatury T_{max} (43°C))

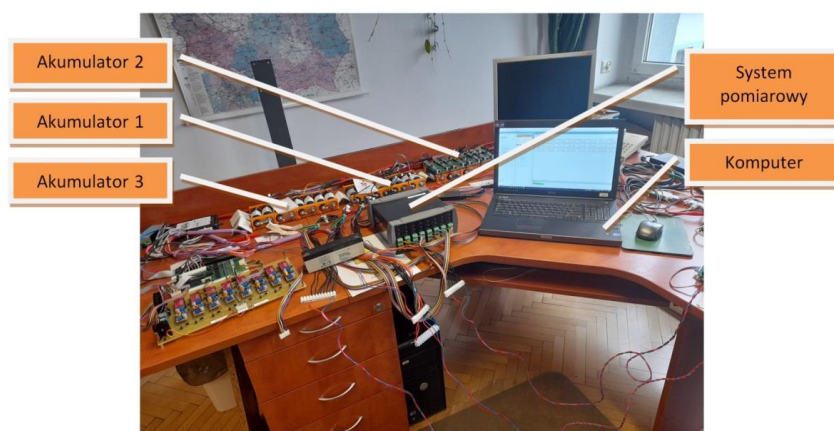
Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, że praca badanych ogniw w warunkach pokojowych ze swobodną wymianą ciepła nie stwarza zagrożeń, jeżeli prąd rozładowania (obciążenia) nie przekracza 50% wartości standardowej. Temperatura ogniwa rośnie wówczas wykładniczo wraz z wartością prądu. Jednak po osiągnięciu minimalnej wartości napięcia U_{min} nie przekracza ona $+33^\circ\text{C}$. Jest to wartość akceptowana przez producenta. Oczywiście wraz ze wzrostem wartości prądu obciążenia czas trwania rozładowania się ogniwa zmniejsza się prawie liniowo. Podwyższona temperatura otoczenia od $+5^\circ\text{C}$ do $+60^\circ\text{C}$ wymusza temperaturę ogniwa na tym samym poziomie. Należy podkreślić, że dla temperatury otoczenia z zakresu od $+20^\circ\text{C}$ do $+60^\circ\text{C}$ praktycznie nie stwierdzono jej istotnego wpływu na wartość i czas obniżania się napięcia, jeśli prąd nie przekraczał 40% wartości standardowych. Wręcz przeciwnie, przy obniżonej temperaturze otoczenia czas rozładowania ulega skróceniu. Np. obniżenie temperatury z $+20^\circ\text{C}$ do $+5^\circ\text{C}$ skraca ten czas o około 10%.

Niewielkie jednorazowe przeładowania (do około 20% napięcia) i przypadkowe krótkotrwałe głębokie rozładowania (do około 10% napięcia i prąd poniżej 50% prądu standardowego) nie stanowią większego zagrożenia. Jest to tym ważniejsze, że ogniwa pracują efektywniej w górnym zakresie temperatur (do $+65^{\circ}\text{C}$). Takie przypadki należy jednak dokładnie kontrolować i im zapobiegać, gdyż ich powtarzanie prowadzi do znacznego wzrostu temperatury ogniwa powyżej wartości dopuszczalnej. Wynika to między innymi z dużej bezwładności cieplnej testowanych ogniw. Dlatego też badane ogniwa nadają się do zastosowania jako źródło zasilania wybranych maszyn górniczych, ale tylko jeśli są wyposażone w efektywny system zarządzania baterią (BMS).

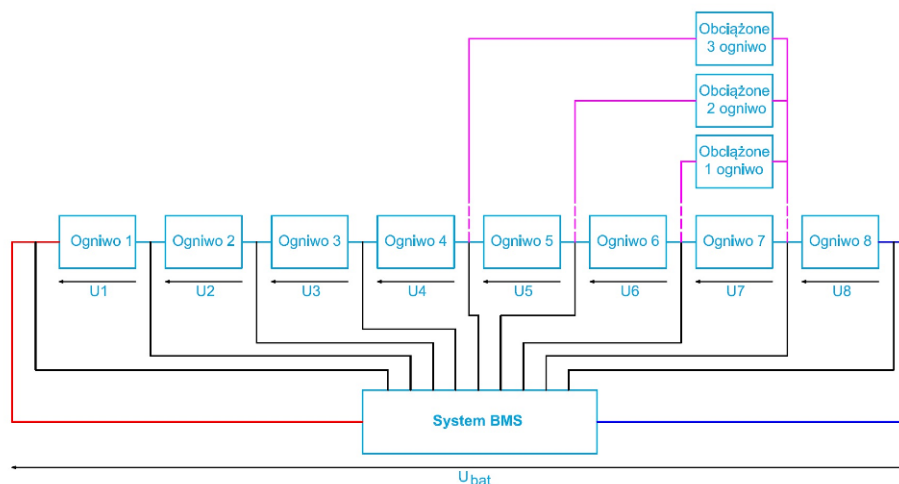
7.2. Badania modelowe na stanowisku laboratoryjnym w symulowanych warunkach pracy i stałych warunkach środowiskowych

Po zakończeniu testów temperaturowych dla niezależnych ogniw przeprowadzono dalsze badania dla trzech akumulatorów, z których każdy skompletowany został z ośmiu szeregowo połączonych jednakowych ogniw litowo-żelazowo-fosforanowych o napięciu znamionowym 3,2 V i pojemności 10 Ah. Były one następnie kolejno łączone do współpracy z odpowiednim aktywnym i/lub pasywnym systemem BMS dla porównania. Zbadano najpierw ich wydajność w temperaturze pokojowej (około $+20^{\circ}\text{C}$, wilgotność 40%) przy swobodnym przenoszeniu ciepła z akumulatora do otoczenia. Widok stanowiska badawczego wyposażonego zarówno w system pomiaru temperatury i napięcia (system rejestracji danych DT8873-24 VOLT), jak i komputer ze specjalistycznym oprogramowaniem przedstawiono na rys. 7.21.



Rys. 7.21. Stanowisko badawcze z systemem pomiaru temperatury i napięcia. Akumulator nr 1 podłączony do systemu BMS z balansowaniem aktywnym metodą bateria do ogniwa. Akumulator nr 2 podłączony do systemu BMS z balansowaniem aktywnym metodą ogniwo do baterii. Akumulator nr 3 podłączony do systemu BMS z balansowaniem pasywnym

Aby przetestować skuteczność balansowania opracowanych systemów BMS, potrzebne było asymetryczne rozładowywanie się baterii ogni. Dlatego dla baterii nieobciążonej wybrane losowo ogniwa (od 1 do 3, czyli od 12,5% do 37,5% całkowitej liczby ogni) były rozładowywane niezależnie, w układzie jak pokazano na rys. 7.22. Przyjęto prąd obciążenia równy 2,5 A, co stanowi 25% wartości jego standardowego prądu rozładowania. Kontrolowano zarówno napięcie, jak i wartości temperatury całej baterii oraz poszczególnych ogni.



Rys. 7.22. Schemat blokowy układu testowania ogniw dla badanych akumulatorów z podłączonym systemem BMS podczas symulacji nierównomiernego obciążania się jedno-, dwu- i/lub trzyogniowego

Konfiguracja systemów BMS

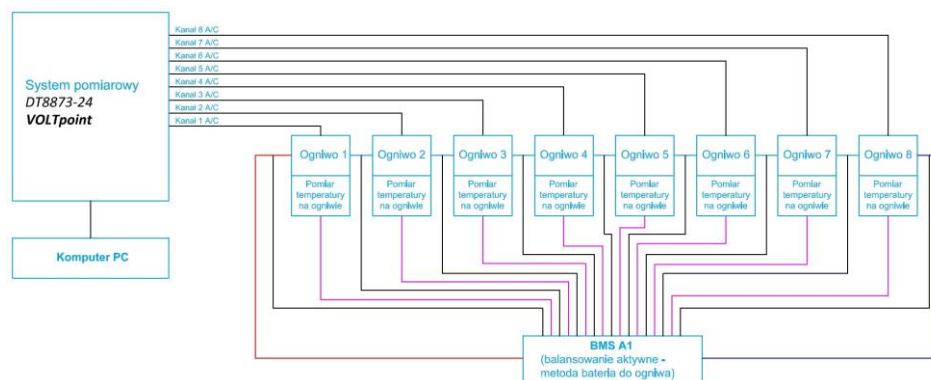
W celu porównania efektywności działania systemów (układów) BMS z balansowaniem aktywnym, ich parametry techniczne zostały jednakowo skonfigurowane. W obu przypadkach balansowanie rozpoczyna się, po wykryciu na ogniwie napięcia poniżej 3,05 V, natomiast przerwanie balansowania następuje, gdy napięcie na wszystkich ogniwach jest mniejsze niż 2,55 V lub gdy napięcie na którymkolwiek ogniwie jest mniejsze niż 2,5 V lub większe niż 3,65 V. Wartość prądu balansowania była stała i równa 2 A.

W przypadku zakupionego układu BMS z balansowaniem pasywnym wartość prądu balansowania została ustalona z góry przez producenta na poziomie 350 mA, parametry techniczne natomiast były konfigurowane za pomocą oprogramowania komputerowego. W wyniku konfiguracji zostało ustawione odpowiednie balansowanie ogni, które rozpoczyna się, gdy napięcie na ogniwach mieści się w przedziale od 3,2 V do 3,65 V oraz jest wyłączane, gdy napięcie na którymkolwiek ogniwie jest mniejsze niż 2,5 V lub większe niż 3,65 V.

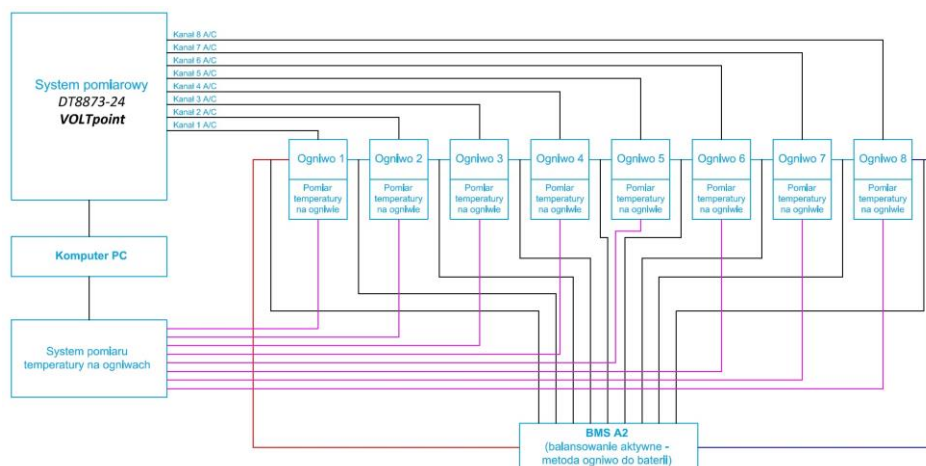
Połączenia układu pomiarowego ogniw w akumulatorach współpracujących z badanymi systemami BMS

Schematy blokowe połączeń ogniw w akumulatorach przy ich współpracy z badanymi systemami BMS pokazano na rys. 7.23 - 7.25. Aby można było porównać działanie systemów BMS, wszystkie ogniwa w akumulatorze zostały podłączone do zewnętrznego systemu pomiarowego DT8873-24 VOLTpoint, posiadającego 24 kanały pomiarowe, mierzące napięcie w zakresie od 0 V do 5 V. Widoczna rozbieżność przebiegów otrzymanych charakterystyk wynika z różnicy działania badanych systemów BMS oraz sposobów pomiaru i zapisu danych w systemie pomiarowym. W badanych systemach BMS pomiar i zapis napięcia na ogniwach akumulatorów był wykonywany wówczas, gdy systemy BMS miały wyłączoną funkcję balansowania ogniw. Natomiast napięcia od U_1 do U_8 były rejestrowane cyklicznie co 100 ms przez system pomiarowy. Zapis napięcia oznacza rejestrację zmierzonej wartości w komputerze. Wartość okresu próbkowania, która jest równa 100 ms w użytym systemie pomiarowym została dobrana w taki sposób, aby można było uzyskać dużą dokładność wyników. Jest to związane z szybkimi zmianami napięcia podczas balansowania ogniw, zwłaszcza, gdy napięcie na ogniwie obniża się do 2,5 V. Uwidacznia się to brakiem synchronizacji pomiarów.

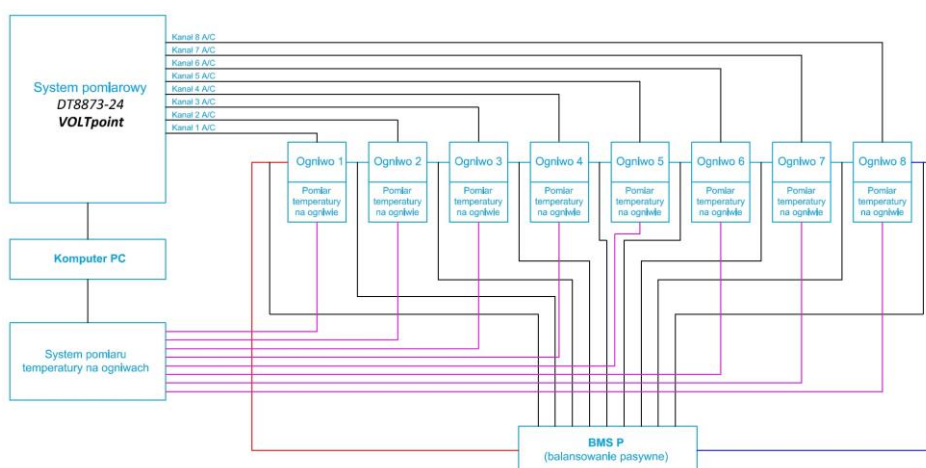
Z tego względu część wyników pomiarowych została zarejestrowana przy wyłączonym balansowaniu, a pozostała część – przy jego aktywnym działaniu. W rezultacie niektóre przebiegi charakterystyk mogą nie tworzyć jednolitych linii, co jednak nie wpływa na wiarygodność ani znaczenie uzyskanych wyników pomiarowych.



Rys. 7.23. Schemat blokowy układu pomiarowego ogniw w akumulatorze z podłączonym systemem BMS z balansowaniem aktywnym metodą baterii do ogniw

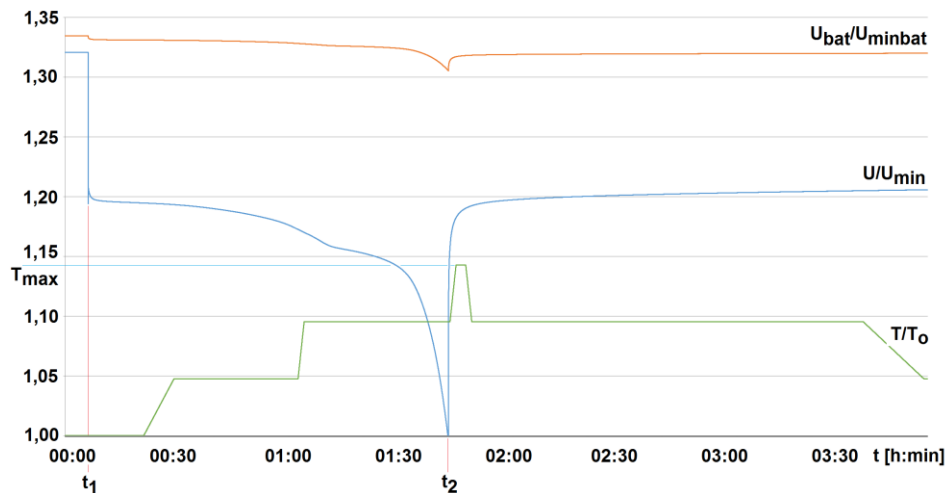


Rys. 7.24. Schemat blokowy układu pomiarowego ogniw w akumulatorze z podłączonym systemem BMS z balansowaniem aktywnym metodą ogniwo do baterii



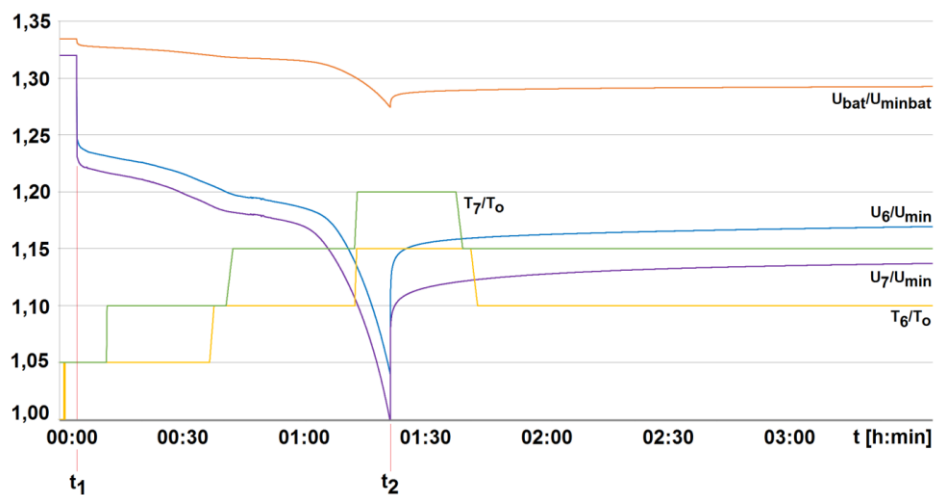
Rys. 7.25. Schemat blokowy układu pomiarowego ogniw w akumulatorze z podłączonym systemem BMS z balansowaniem pasywnym

Przeprowadzone badania pracy akumulatora bez układu BMS wykazały, że ze wzrostem liczby asymetrycznie obciążanych ogniw skraca się proporcjonalnie zarówno czas trwania obniżania się napięcia danego obciążanego ogniwa do jego wartości minimalnej (2,5 V), jak również maleje wartość napięcia wypadkowego na zaciskach akumulatora. Napięcie nieobciążonego akumulatora U_{bat}/U_{minbat} maleje od ok. 1,31 (dla jednego obciążonego ogniwa) do ok. 1,24 (dla trzech obciążonych ogniw) odpowiednio. Nie wzrasta natomiast jednoznacznie, do liczby obciążanych ogniw, wartość ich temperatury co można porównać z przebiegów pokazanych dla przykładu na rys. 7.26 - 7.28.

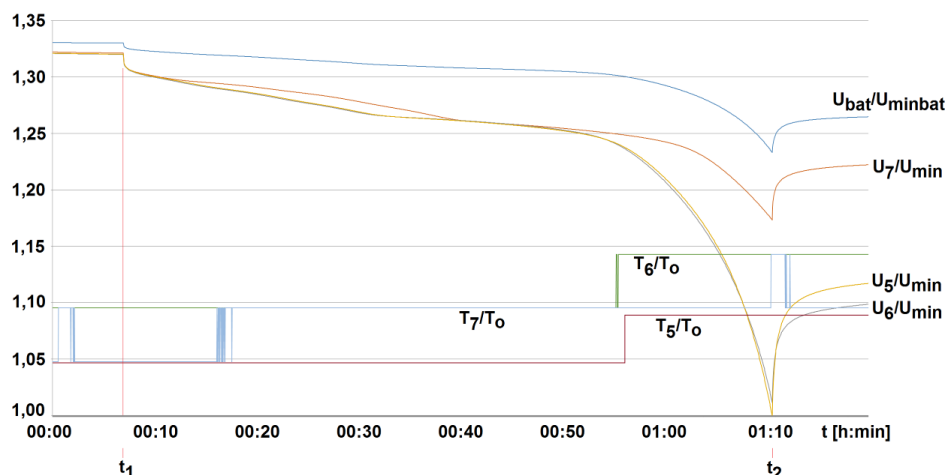


Rys. 7.26. Napięcie $U/U_{\min}$ oraz przebiegi temperatury T/T_0 w czasie dla jednego ogniwa obciążonego (ogniwo nr 7 – patrz rys. 7.22) przy nieobciążonej baterii bez systemu BMS (temperatura pokojowa $T_0 = 20^\circ\text{C}$, chłodzenie swobodne, t_1 , t_2 - moment załączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A przy odpowiednim doładowaniu,

$U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora równe 20V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalnie 29,2 V)



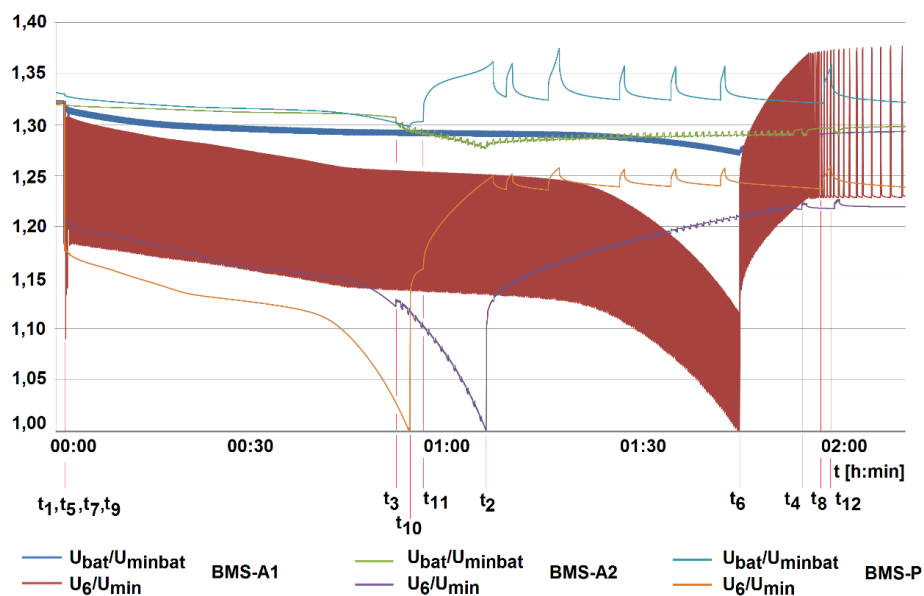
Rys. 7.27. Napięcia $U_6/U_{\min}$ i $U_7/U_{\min}$ oraz zmiany temperatury T_6/T_0 , T_7/T_0 w czasie dla dwóch ogniw obciążonych szeregowo (ogniwa nr 6 i nr 7 – patrz rys. 7.22) nieobciążonej baterii bez systemu BMS (temperatura pokojowa $T_0 = 20^\circ\text{C}$, chłodzenie swobodne, t_1 , t_2 - moment załączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5A przy odpowiednim doładowaniu, $U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora 20V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalnie 29,2 V)



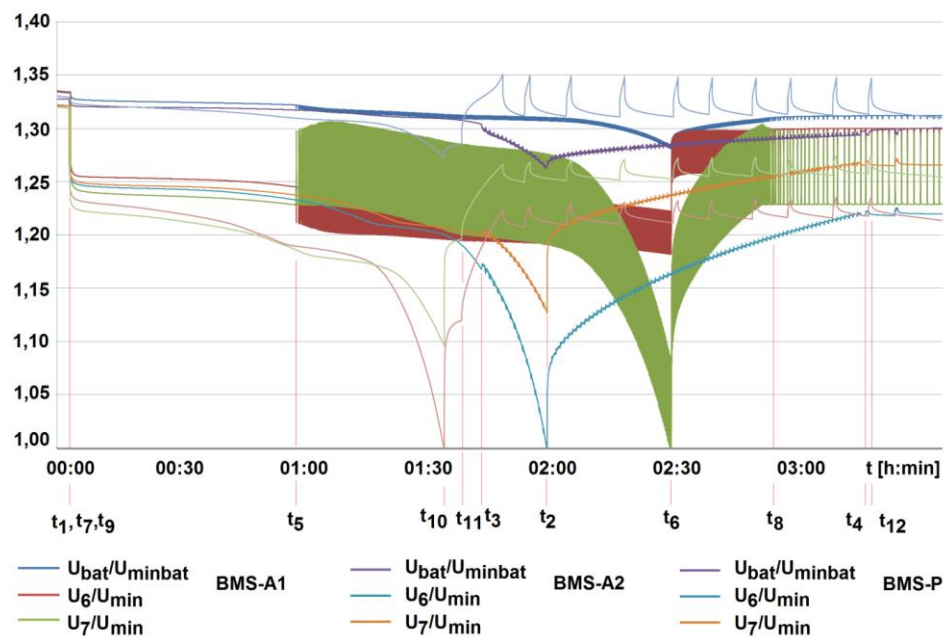
Rys. 7.28. Napięcia $U_5/U_{\min}$, $U_6/U_{\min}$ i $U_7/U_{\min}$ oraz zmiany temperatury T_5/T_0 , T_6/T_0 , T_7/T_0 w czasie dla trzech ogniw obciążonych szeregowo (ogniwa nr 5, nr 6 i nr 7 – patrz rys. 7.22) przy nieobciążonej baterii bez systemu BMS (temperatura pokojowa $T_0 = 20^\circ\text{C}$, chłodzenie swobodne, t_1 , t_2 - moment załączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A przy odpowiednim doładowaniu, $U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalnie 29,2 V)

Wyniki badań wpływu zastosowanego układu BMS

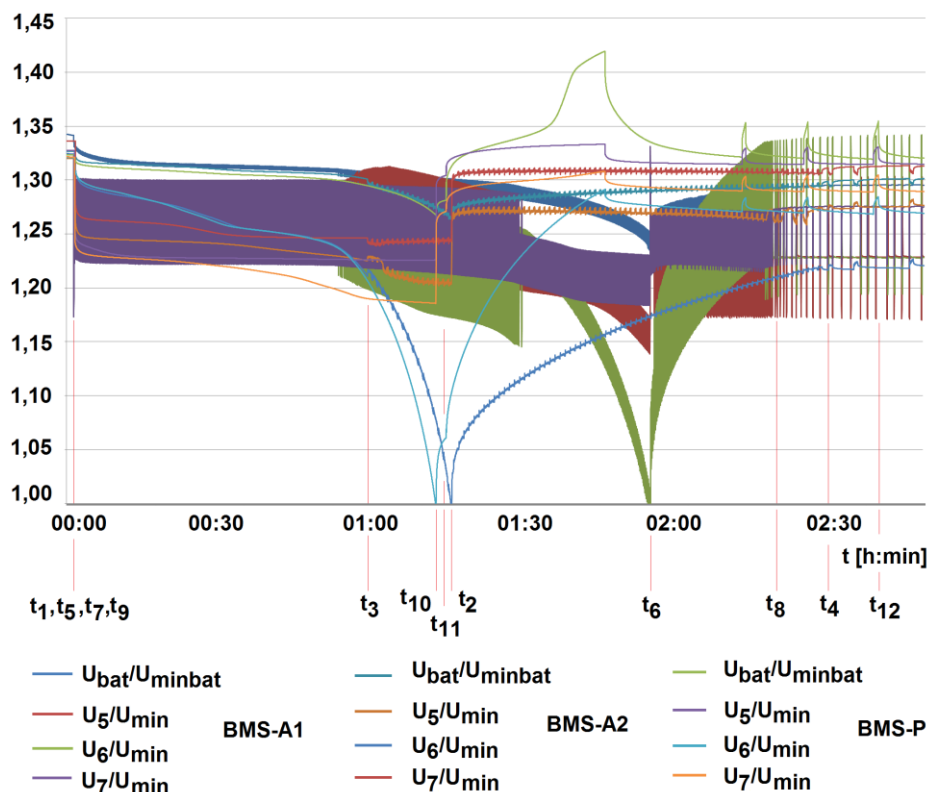
Aby porównać przydatność opracowanych aktywnych systemów BMS (zarówno bateria do ogniwa, jak i ogniwo do baterii), ich parametry techniczne zostały odpowiednio skonfigurowane tak, aby we wszystkich przypadkach balansowanie aktywowało się, gdy napięcie któregośkolwiek z ogniw obniży się poniżej 95% jego wartości znamionowej U_n (tj. poniżej 3,05 V). Aktywowanie to było następnie wyłączane, gdy napięcie albo spadało poniżej minimalnej wartości $U_{\min}$ ($U_{\min} = 2,5$ V) albo było wyższe od $U/U_n = 1,14$ (3,65 V). Wartość prądu balansującego ustalono na 2 A (około 40% standardowego prądu ładowania). Rejestrowano zarówno wartości napięcia i temperatury poszczególnych niesymetrycznie obciążanych ogniw w akumulatorze, jak i zmianę wartości wypadkowego napięcia na zaciskach całego akumulatora wynikającą z niesymetrycznego obciążania ogniw i rodzaju zastosowanego układu BMS. Wybrane reprezentatywne charakterystyki przebiegu procesu rozładowania i balansowania badanych akumulatorów w przypadku ich współpracy z układami BMS dla trzech konfiguracji asymetrii obciążenia ogniw pokazano dla przykładu na rys. 7.29-7.31. Pełne wyniki badań zamieszczono w załączniku I.



Rys. 7.29. Zmienność napięcia w czasie na akumulatorze U_{bat}/U_{minbat} oraz dla jednego ogniwa obciążonego U_6/U_{min} , nieobciążonych baterii z systemami balansowania BMS (metoda: BMS-A1 - bateria do ogniwa, BMS-A2 – ogniwo do baterii, BMS-P – pasywna) (temperatura ustawiona w komorze klimatycznej $T_0 = +20^\circ\text{C}$, $t_1, t_2, t_5, t_6, t_9, t_{10}$ - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, U_{min} - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, U_{minbat} - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), $t_3, t_4, t_7, t_8, t_{11}, t_{12}$ – włączanie i wyłączanie balansowania



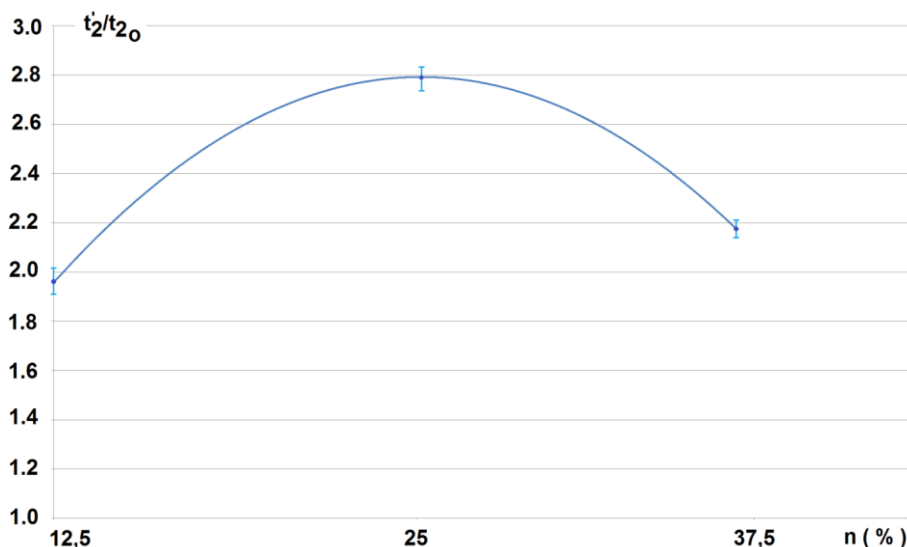
Rys. 7.30. Zmienność napięcia w czasie na akumulatorach oraz dla dwóch ogniw obciążonych U_6/U_{min} i U_7/U_{min} , nieobciążonych baterii z systemami balansowania BMS (metoda: BMS-A1 - bateria do ogniwa, BMS-A2 – ogniwo do baterii, BMS-P – pasywna) (temperatura ustawiona w komorze klimatycznej $T_o = +20^\circ\text{C}$, $t_1, t_2, t_5, t_6, t_9, t_{10}$ - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, U_{min} - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, U_{minbat} - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), $t_3, t_4, t_7, t_8, t_{11}, t_{12}$ - włączanie i wyłączanie balansowania



Rys. 7.31. Zmienność napięcia w czasie na akumulatorach oraz dla trzech ogniw obciążonych U_5/U_{min} , U_6/U_{min} i U_7/U_{min} , nieobciążonych baterii z systemami balansowania BMS (metoda: BMS-A1 – bateria do ogniwa, BMS-A2 – ogniwo do baterii, BMS-P – pasywna) (temperatura ustawiona w komorze klimatycznej $T_0 = +20^\circ\text{C}$), $t_1, t_2, t_5, t_6, t_9, t_{10}$ – moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, U_{min} – minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, U_{minbat} – minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} – napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), $t_3, t_4, t_7, t_8, t_{11}, t_{12}$ – włączanie i wyłączenie balansowania

Z przeprowadzonych badań wynika, że zastosowanie dowolnego z dwóch opracowanych w Instytucie KOMAG aktywnych systemów BMS wydłuża czas t_2 trwania obniżania się napięcia (do wartości minimalnej) obciążanych ogniw na jednym ładowaniu/doładowaniu w porównaniu do pracy bez systemu BMS lub z pasywnym systemem BMS. W przypadku pojedynczego rozładowywanego ogniwa efekt balansowania (wydłużenia czasu pracy rozładowywanych ogniw) jest najslabszy. Stwierdzono, że im większa jest ilość balansowanych ogniw, tym efekt balansowania ogniw jest bardziej widoczny. Jedynym warunkiem jest nieprzekroczenie 50% całkowitej ilości ogniw zastosowanych w akumulatorze. W związku z tym czas pracy baterii jest odpowiednio zwiększony. Stwierdzono jednak, że znacznie lepsze wyniki daje zastosowanie aktywnego systemu BMS wykorzystującego metodę bateria-do-ogniwa. Należy podkreślić, że wprowadzie

napięcie na zaciskach nieobciążonego akumulatora obniża się do podobnej wartości U_{bat}/U_{minbat} równej ok. 1,24 jak bez układu BMS, jednak przy wydłużonym o ok. 100% czasie pracy na jednym naładowaniu/doładowaniu, co widać z porównania na przykład przebiegów pokazanych na rys. 7.28 i 7.31.



Rys. 7.32. Zależność względnego przyrostu czasu trwania pracy t_2 baterii (akumulatora), na jednym ładowaniu z powodu zastosowania aktywnego systemu BMS (bateria do ogniwa), od procentowego udziału ($n\%$) obciążanych szeregowo ogniów w baterii (t_2 , t_2' - czas wyłączenia obciążenia odpowiednio bez i z systemu BMS)

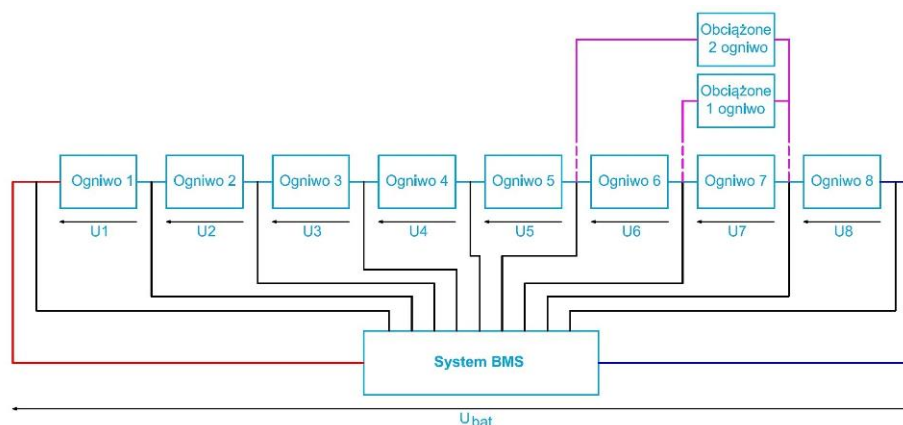
Wydłużenie czasu pracy baterii na jednym ładowaniu może być w tym przypadku znaczące i wielokrotnie przekraczać czas zanikania t_2 , w porównaniu do pracy bez systemu BMS i/lub z pasywnym systemem BMS. Dla przypadku badanej liczby obciążanych ogniów stwierdzono, że efekt ten jest nie mniejszy niż 100%; ale pod warunkiem, że względna liczba nierównomiernie obciążonych ogniów nie przekracza 50% całkowitej liczby ogniów akumulatora.

Należy jednak podkreślić, że efekt ten jest nieliniowy i względny przyrost czasu pracy t_2/t_{20} , dla pojedynczego ładowania jest największy, gdy liczba nierównomiernie obciążonych ogniów akumulatora wynosi około 25%, co pokazano na rysunku 7.32. Badania wykazały ponadto, że temperatura otoczenia przy swobodnym chłodzeniu nie wpływa zarówno na czas trwania rozładowania, jak i nie powoduje nadmiernego wzrostu wartości temperatury ogniwa. W trakcie bowiem rozładowania i po balansowaniu obciążonych ogniów różnica ich temperatury przed i po badaniu nie zwiększyła się o więcej niż o około 8°C. Pełne badania charakterystyk przebiegu zmian temperatury podczas procesów rozładowania i balansowania badanych akumulatorów w przypadku ich współpracy z układami BMS dla trzech konfiguracji asymetrii obciążenia ogniów pokazano w załączniku I.

7.3. Badania modelowe na stanowisku laboratoryjnym w symulowanych warunkach pracy i zmiennych warunkach środowiskowych

Badania przeprowadzono dla akumulatorów (składających się z ośmiu ogniw litowych LiFePO_4 , 10 Ah, typu Headway LFP38120 (S) [41]) pracujących w różnych wartościach temperatury zarówno pokojowej (ok. $+20^\circ\text{C}$, wilgotność ok. 40%), jak i podwyższonej (do około $+60^\circ\text{C}$). Należy zaznaczyć, że dla różnych wartości temperatury zewnętrznej wymianę ciepła z otoczeniem pogarszają wymuszone warunki testowe wewnątrz komory klimatycznej (temperatura regulowana skokowo od $+5^\circ\text{C}$ do $+60^\circ\text{C}$ przy stałej wilgotności 75%) (rys. 7.34). Stanowisko badawcze zostało wyposażone w system pomiaru temperatury i napięcia (DT8873-24 VOLTpoint) oraz komputer ze specjalistycznym oprogramowaniem.

Przygotowane do badań zestawy baterii (nieobciążonej) były następnie podłączane do współpracy z odpowiednim aktywnym systemem BMS będącym przedmiotem badań (rys. 7.33). Asymetrię obciążenia wybranych ogniw (odpowiednio od 1 do 2-ch, rys. 7.33) wykonywano dla prądu rozładowania równego ok. 25% wartości standardowego rozładowania (2,5 A). Każde badanie rozpoczynano od w pełni naładowanego akumulatora (napięcie wszystkich ogniw równe znamionowemu $U_n = 3,2 \text{ V}$). Obciążenie prądem 2,5 A trwało do momentu, gdy napięcie na zaciskach któregośkolwiek z ogniw osiągnęło minimalną wartość $U_{\min}$ (równą 2,5 V).



Rys. 7.33. Schemat blokowy układu testowania ogniw dla badanych akumulatorów z podłączonym aktywnym systemem BMS podczas symulacji obciążenia jedno- oraz dwuogniwowego

Aby porównać efekty pracy opracowanych aktywnych systemów BMS, dobrano odpowiednio ich parametry techniczne. Dlatego dla obu aktywnych systemów balansowanie aktywowano, gdy napięcie ogniwa spadało poniżej 3,05 V ($U/U_n = 0,95$). Wyłączane zaś było, gdy na zaciskach wszystkich

zastosowanych ogniw wartość napięcia była niższa od 2,55 V ($1,02 U_{\min}$) i/lub gdy była niższa niż $U_{\min} = 2,5$ V lub wyższa niż 3,65 V ($U/U_n = 1,14$) odpowiednio. Wartość prądu balansującego została ustalona na 2 A (około 40% standardowego prądu ładowania).

Widoczne na rys. 7.35 i 7.36 różnice w przebiegu napięć wynikają jedynie ze sposobu pomiaru i rejestracji danych. Nie wpływa to jednak w żaden sposób na dokładność pomiaru i ocenę analizowanego efektu balansowania.

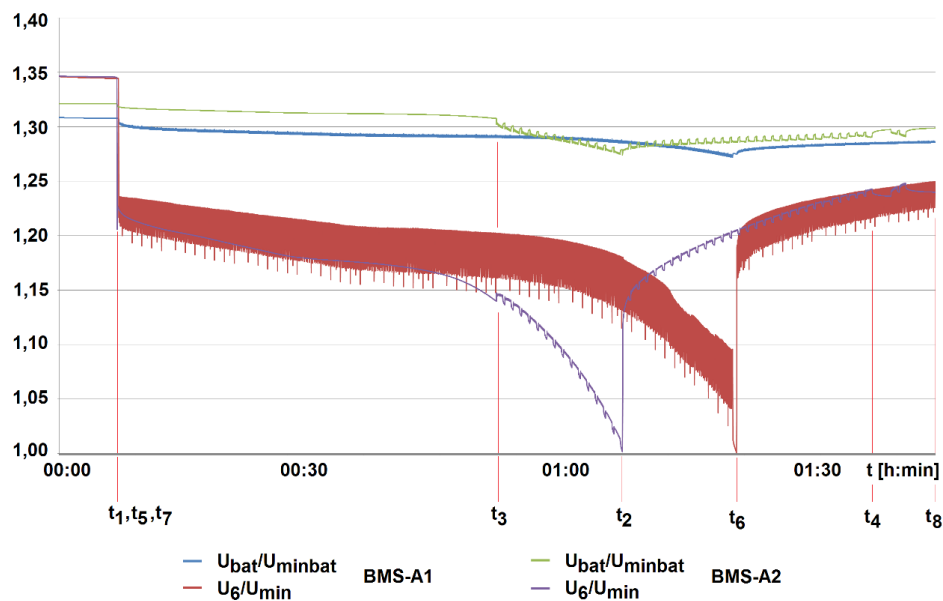


Rys. 7.34. Rozmieszczenie pakietów akumulatorowych w komorze klimatycznej. Akumulator nr 1 podłączony do systemu BMS z balansowaniem aktywnym metodą bateria do ogniwa. Akumulator nr 2 podłączony do systemu BMS z balansowaniem aktywnym metodą ogniwo do baterii

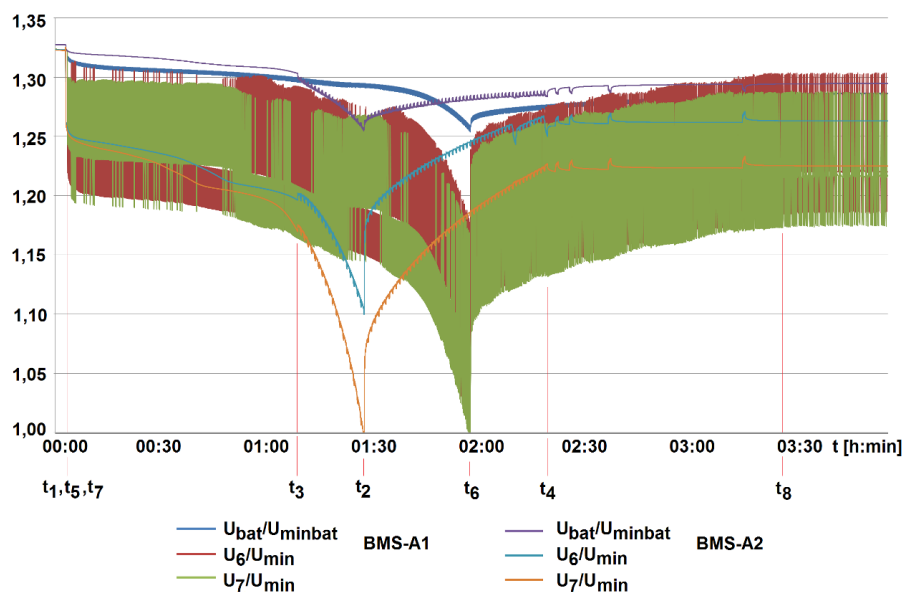
Wyniki badań

Z przeprowadzonych badań wynika, że zastosowanie dowolnego z opracowanych aktywnych układów balansujących (aktywny system BMS) wydłuża czas pracy rozładowywanego ogniwa (do minimalnej wartości napięcia $U_{\min} = 2,5$ V). Zwiększa się więc odpowiednio czas pracy baterii. W przypadku zastosowania metody ogniwo-do-baterii o ponad 30%, a w przypadku metody bateria-do-ogniwa o ponad 70%, odpowiednio dla dwóch balansowanych (rozładowywanych) ogniw w temperaturze 20°C (wybrane wyniki pomiarów pokazano na rysunkach 7.35-7.36). Wraz ze wzrostem liczby balansowanych (rozładowywanych) ogniw (pod warunkiem, że nie przekracza to 50% całkowitej liczby zastosowanych ogniw) efekt ten staje się bardziej widoczny. Wyniki badań pokazały, że najlepsze efekty osiągnięto w temperaturze pokojowej (20°C) przy zastosowaniu aktywnego BMS opartego na metodzie bateria-do-ogniwa (oznaczanej jako BMS-A1). Wraz ze wzrostem

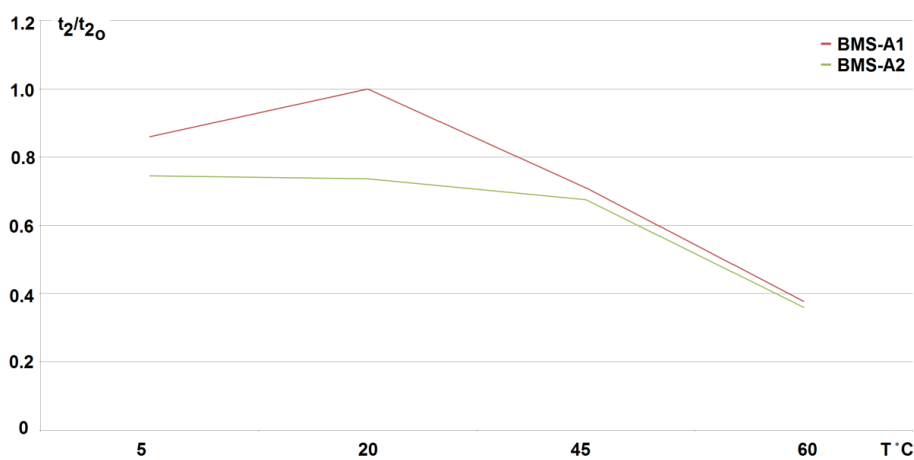
wartości prądu rozładowywania/obciążenia oraz liczby ogniw czas trwania balansowania (rozładowania) zmniejsza się liniowo przy wzroście temperatury. Dla 2-ch ogniw rozładowywanych (ok 25% całkowitej liczby ogniw) prądem zwiększonym do 25% wartości standardowego rozładowania (2,5 A) zależność czasu zaniku (obniżenia napięcia na najsłabszym ogniwie do wartości minimalnej 2,5 V) t_2 od temperatury pokazano dla przykładu na rys. 7.37. Należy zauważyć, że choć wzrost temperatury otoczenia znacznie skraca czas rozładowania, to nie powoduje nadmiernego wzrostu temperatury samego ogniwa. W trakcie bowiem rozładowania i po balansowaniu obciążonych ogniw różnica ich temperatury przed i po badaniu nie zwiększyła się o więcej niż o około 4°C. Wyniki pełnych badań zamieszczono w załączniku II.



Rys. 7.35. Zmienność napięcia w czasie na zaciskach akumulatora U_{bat}/U_{minbat} oraz jednego ogniwa obciążonego U_6/U_{min} , dla nieobciążonych baterii (akumulatorów) z aktywnymi systemami balansowania BMS (metoda BMS-A1 - bateria do ogniwa, BMS-A2 - ogniwa do baterii) (temperatura ustawiona w komorze klimatycznej $T_0 = +20^\circ\text{C}$), t_1, t_2, t_5, t_6 - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, U_{min} - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, U_{minbat} - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3, t_4, t_7, t_8 - włączanie i wyłączanie aktywnego balansowania



Rys. 7.36. Zmienność napięcia w czasie na zaciskach akumulatora oraz dwóch ogniw obciążonych U_6/U_{min} i U_7/U_{min} , nieobciążonych baterii (akumulatorów) z aktywnymi systemami balansowania BMS (metoda BMS-A1 - bateria do ogniwa, BMS-A2 - ogniwa do baterii) (temperatura ustawiona w komorze klimatycznej $T_o = +20^\circ\text{C}$), t_1, t_2, t_5, t_6 - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, U_{min} - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, U_{minbat} - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3, t_4, t_7, t_8 - włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



Rys. 7.37. Zależność czasu t_2 obniżenia się napięcia ogniwa do wartości minimalnej ($U_{min} = 2,5$ V) od temperatury otoczenia T przy zastosowaniu aktywnych systemów BMS (metoda BMS-A1-bateria do ogniwa, BMS-A2-ogniwa do baterii); t_{2o} - czas odniesienia dla 20°C wynosi $t_{2o} = 114$ min dla BMS-A1)

Reasumując należy stwierdzić, że niezależnie od wartości temperatury otoczenia najkorzystniejszy wydaje się być jednoznacznie układ z aktywnym balansowaniem metodą bateria do ogniwa (BMS-A1). Najdłużej utrzymuje się bowiem napięcie powyżej wartości minimalnej zarówno na rozładowanym ogniwie/ogniwach, jak i na zaciskach całego akumulatora. Taka sytuacja jest korzystna, gdyż wydłuża czas pracy baterii na jednym naładowaniu/doładowaniu bez konieczności częstego jej odłączania od urządzenia zasilanego na czas ponownego ładowania. Należy jednak stwierdzić, że zastosowanie drugiego opracowanego aktywnego układu (BMS-A2) opartego na metodzie ogniwo do baterii pozwoliło również na dłuższe utrzymanie napięcia na ogniwie/ogniwach, ale tylko w porównaniu z balansowaniem pasywnym. Należy zaznaczyć, że porównując dane z rys. 7.37 należy stwierdzić krótszy (o około 30%) czas t_{20} (przy 20°C) dla pakietu akumulatorów z zastosowanym systemem aktywnym BMS-A2.

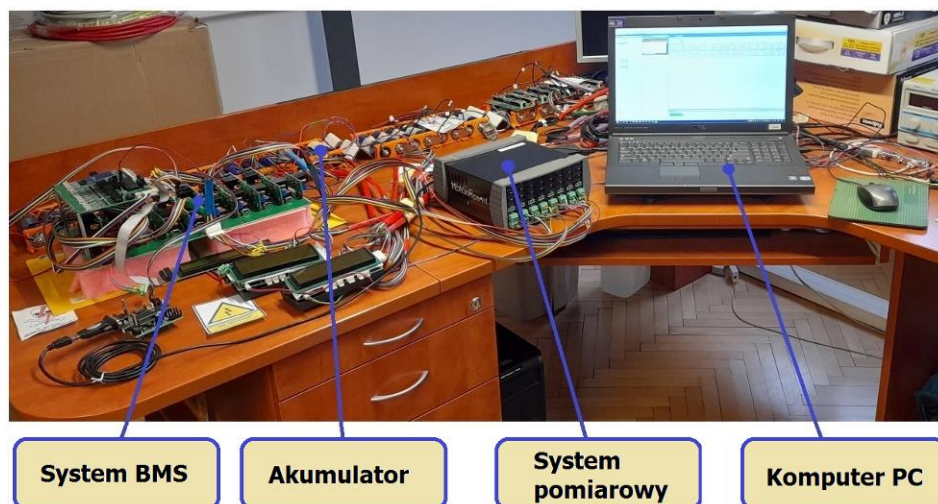
8. Badania stanowiskowe aktywnego systemu balansowania BMS dla wybranej maszyny górniczej (ciągnika) PCA-1

Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki badań laboratoryjnych i stanowiskowych zaprojektowano i wykonano dedykowany układ aktywnego BMS bazujący na metodzie bateria do ogniwa i współpracujący z baterią akumulatorową (wykonaną z wybranych ogniw litowo-żelazowo-fosforowych) do zasilania podwieszanego ciągnika górniczego typu PCA-1. Opracowany system BMS składa się z dwóch podstawowych części składowych tj. modułu pomiarowo-sterującego oraz modułu balansującego tak jak pokazano na rys. 8.1.



Rys. 8.1. Widok modułów podstawowych systemu BMS z aktywnym balansowaniem

W tym celu do badań stanowiskowych-laboratoryjnych aktywnego systemu BMS wykonano akumulator składający się z 15 szeregowo połączonych ogniw litowo-żelazowo-fosforanowych o napięciu znamionowym 3,2 V i pojemności 10 Ah typu Headway LFP38120(S). Stanowi to wymaganą ilość ogniw do zastosowania w podwieszanym ciągniku typu PCA-1. Badania wykonano przede wszystkim w temperaturze pokojowej (około + 20°C, wilgotność 40%) przy swobodnym oddawaniu ciepła z akumulatora do otoczenia. Widok stanowiska badawczego wyposażonego zarówno w system pomiaru temperatury i napięcia (system rejestracji danych DT8873-24 VOLT), jak i komputer ze specjalizowanym oprogramowaniem przedstawiono na rys. 8.2.



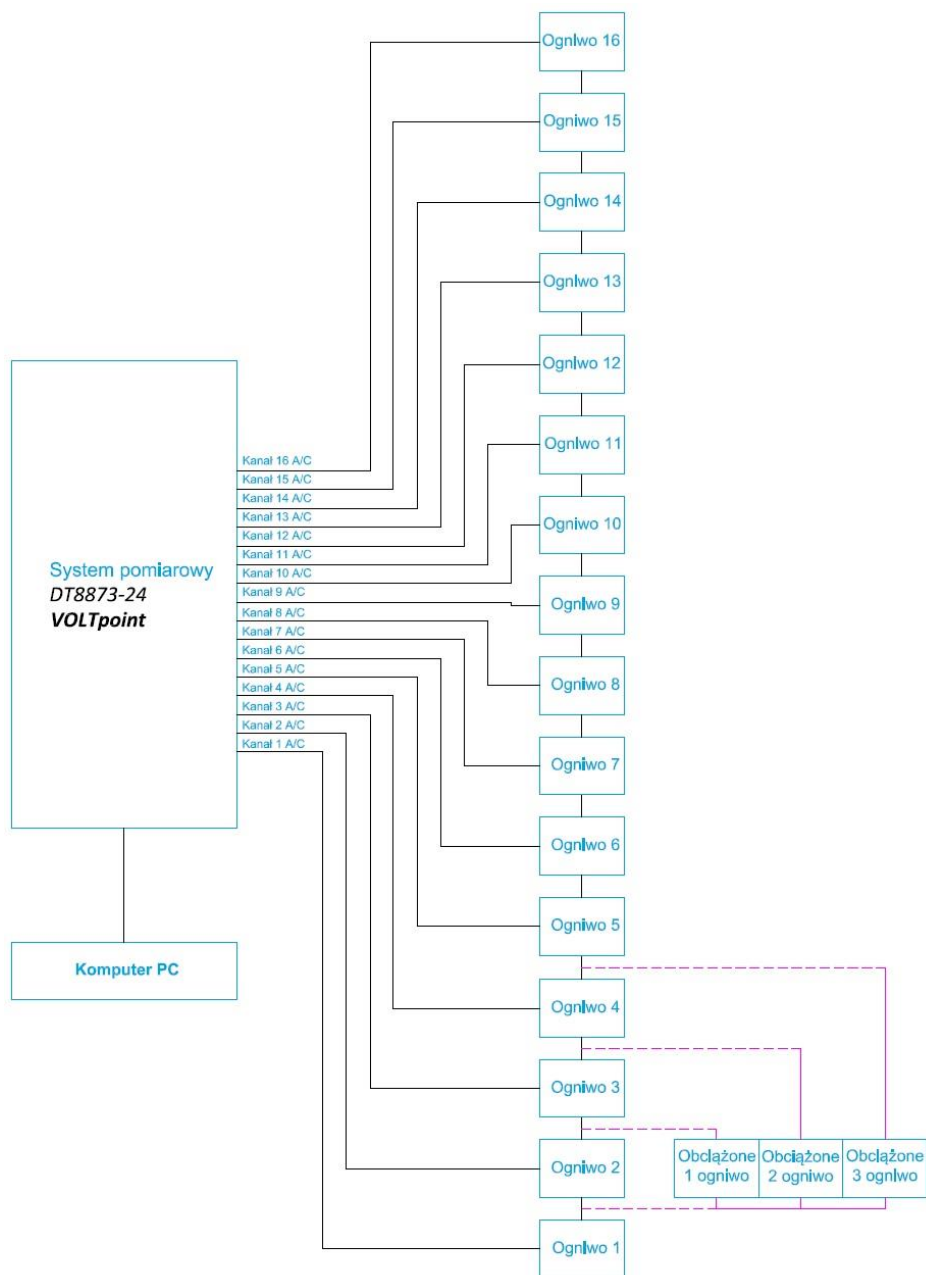
Rys. 8.2. Widok stanowiska badawczego

W celu określenia skuteczności balansowania aktywnego systemu BMS, przeprowadzono badania efektywności jego pracy podczas asymetrycznego obciążania ogniw w baterii akumulatorowej. W tym celu wybrano losowo (dla baterii nieobciążonej) ograniczoną liczbę ogniw (od 1 do 3, czyli od 7% do 20% całkowitej liczby ogniw) do niezależnego ładowania/rozładowywania, tak jak pokazano to na rys. 8.3. Przyjęto prąd obciążenia równy 2,5 A, co stanowi 25% wartości standardowego prądu rozładowania ogniwa. Podczas badań monitorowano zarówno napięcie ogniw, jak i całej baterii akumulatorowej oraz ich temperaturę.

Każde poszczególne badanie było inicjowane dla w pełni naładowanego akumulatora (wartość napięcia wszystkich ogniw było równe znamionowemu $U_n = 3,2 \text{ V}$).

Balansowanie systemu BMS uaktywnia się po wykryciu obniżenia się na ogniwie wartości napięcia poniżej 3,05 V. Zakończenie jego aktywności następuje, gdy napięcie na wszystkich ogniwach jest mniejsze niż 2,55 V lub gdy napięcie na którymkolwiek ogniwie jest mniejsze niż 2,5 V lub większe niż 3,65 V. Wartość prądu balansowania jest stała i wynosi 2 A.

Rozładowanie ogniwa/ogniw (prądem 2,5 A) trwało do momentu, gdy napięcie któregośkolwiek z ogniw osiągnęło minimalną wartość ($U_{\min} = 2,5 \text{ V}$) podaną przez producenta. Przeprowadzone badania wykazały, że zarówno wartości napięć tego samego typu ogniw, jak i ich temperatura mogą różnić się od siebie nawet podczas ich obciążania (rozładowania) tą samą wartością prądu. Dla wybranych 3 ogniw (20% wszystkich ogniw baterii) akumulatora pracującego bez systemu BMS jest to wyraźnie widoczne w pomierzonych przebiegach napięciowych pokazanych dla przykładu na rys. 8.4, 8.5 i 8.6. Uzasadnia to bezwzględną potrzebę korzystania z odpowiedniego aktywnego systemu BMS.



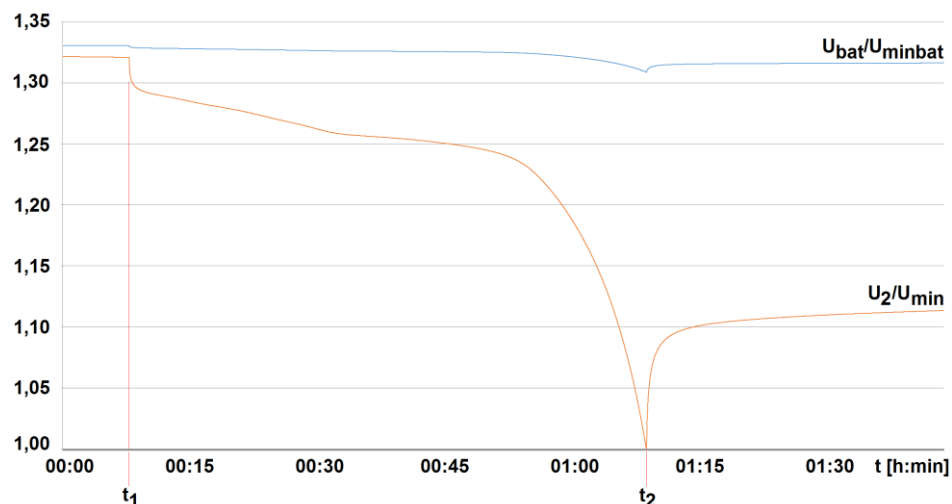
Rys. 8.3. Schemat blokowy układu testowania ogniw dla badanego 15-ogniowego akumulatora z podłączonym aktywnym systemem BMS podczas symulacji niesymetrycznego obciążenia jedno-, dwu- oraz trzyogniowego

Wyniki badań

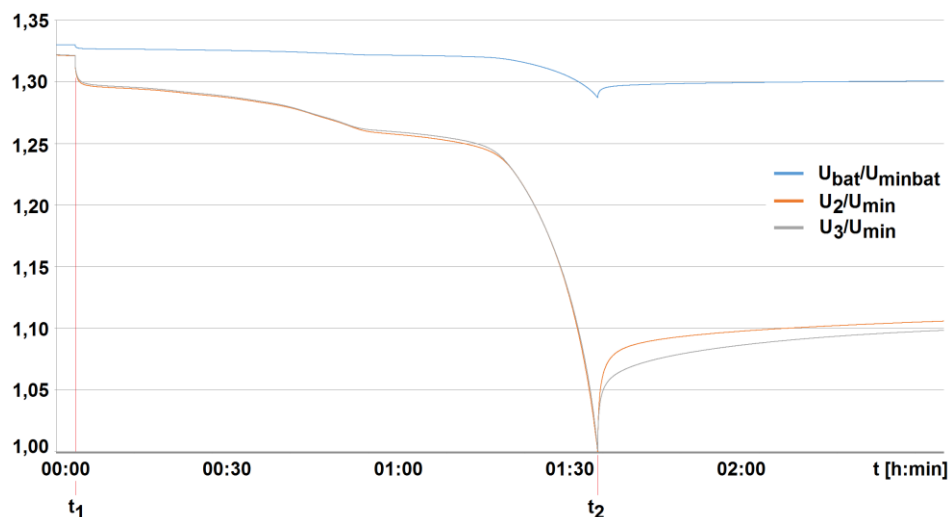
Podczas przeprowadzonych badań, aby porównać wydajność opracowanego aktywnego systemu BMS (metodą bateria do ogniwa), parametry techniczne zostały odpowiednio dopasowane tak, aby balansowanie aktywowało się, gdy napięcie któregośkolwiek z ogniw spadnie poniżej 95% wartości znamionowej, tj. wartość U_n poniżej 3,05 V. Balansowanie jest wyłączane, gdy napięcie jest niższe niż minimalna wartość $U_{\min}$ ($U_{\min} = 2,5$ V) lub wyższe niż $U/U_n = 1,14$ (3,65 V). Wartość prądu balansującego ustalono na 2 A (około 40% standardowego prądu ładowania).

Z przeprowadzonych badań wynika, że zastosowanie opracowanego aktywnego systemu BMS wydłuża czas trwania rozładowania (obniżania się napięcia) akumulatora t_2 na jednym (pojedynczym) ładowaniu w porównaniu do pracy bez systemu BMS. W związku z tym żywotność baterii zwiększa się odpowiednio (rys. 8.7, 8.9 i 8.11).

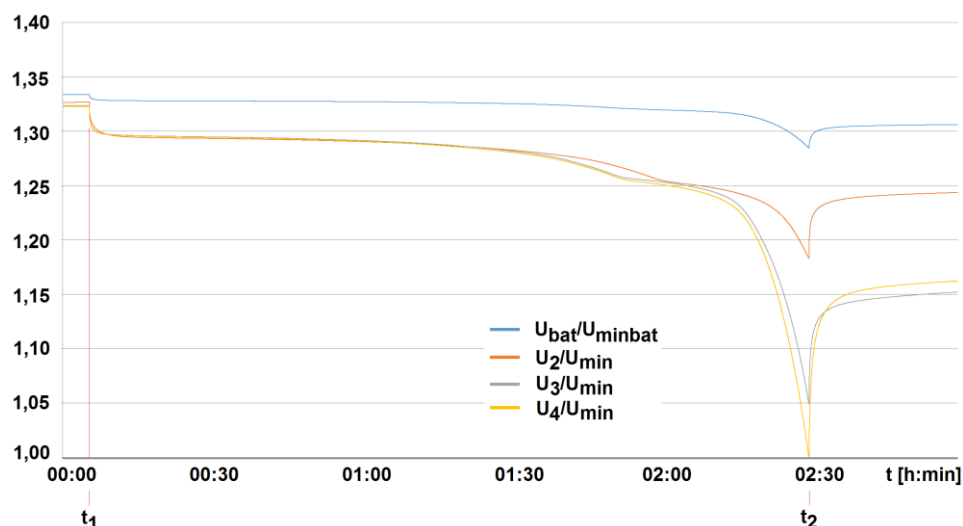
Wydłużenie czasu pracy baterii na jednym ładowaniu może być znaczące i wielokrotnie przekraczać czas rozładowania t_2 , w porównaniu do pracy bez systemu BMS.



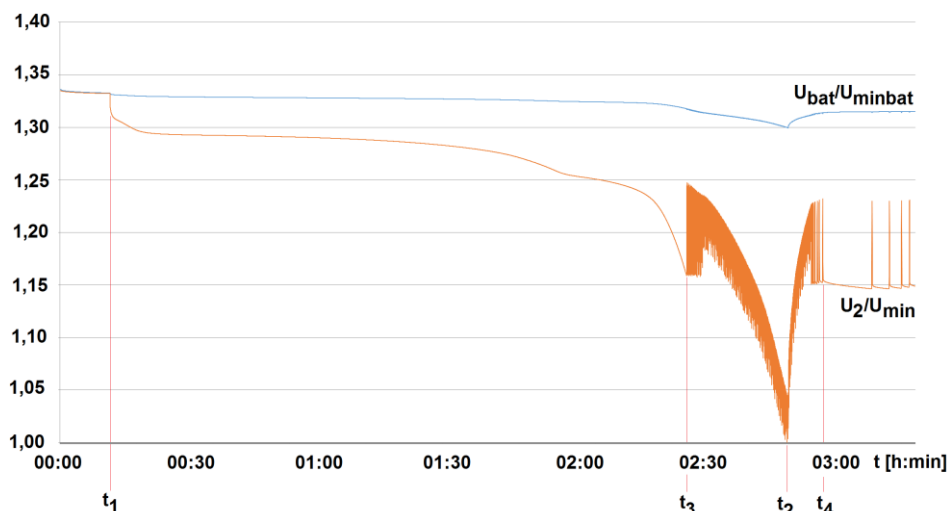
Rys. 8.4. Zmiany napięcia $U_2/U_{\min}$ w czasie dla jednego ogniwa obciążonego szeregowo (ogniwa nr 2 - patrz rys. - 8.3) akumulatora nieobciążonego bez systemu BMS (temperatura pokojowa $T_o = 21^{\circ}\text{C}$, chłodzenie swobodne,) t_1 , t_2 - moment włączenia i wyłączenia prądu obciążenia 2,5 A przy odpowiednim doładowaniu, $U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora 37,5 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 54,75 V)



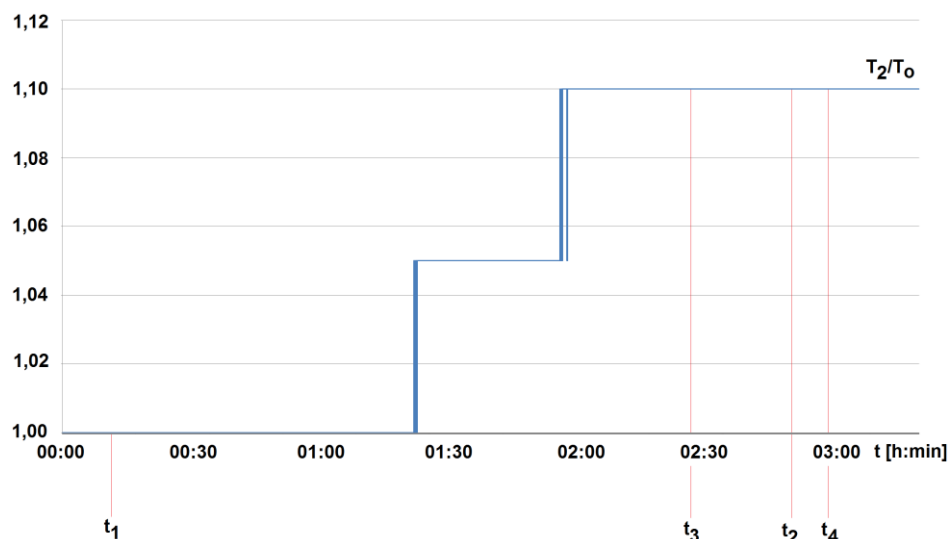
Rys. 8.5. Zmiany napięcia $U_2/U_{\min}$, $U_3/U_{\min}$ w czasie dla dwóch ogniw obciążonych szeregowo (ogniwa nr 2 i nr 3 - patrz rys. 8.3) akumulatora nieobciążonego bez systemu BMS (temperatura pokojowa $T_o = 21^\circ\text{C}$, chłodzenie swobodne,) t_1 , t_2 - moment włączenia i wyłączenia prądu obciążenia 2,5 A przy odpowiednim doładowaniu, $U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora 37,5 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 54,75 V)



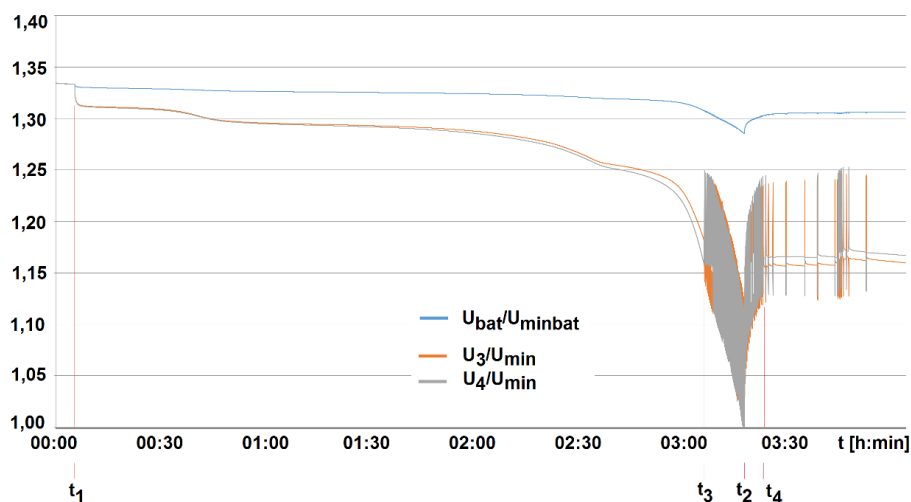
Rys. 8.6. Zmiany napięcia $U_2/U_{\min}$, $U_3/U_{\min}$, $U_4/U_{\min}$ w czasie dla trzech ogniw obciążonych szeregowo (ogniwa nr 2, nr 3 i nr 4 - patrz rys. 8.3) akumulatora nieobciążonego bez systemu BMS (temperatura pokojowa $T_o = 21^\circ\text{C}$, chłodzenie swobodne,) t_1 , t_2 - moment włączenia i wyłączenia prądu obciążenia 2,5 A przy odpowiednim doładowaniu, $U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora 37,5 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 54,75 V)



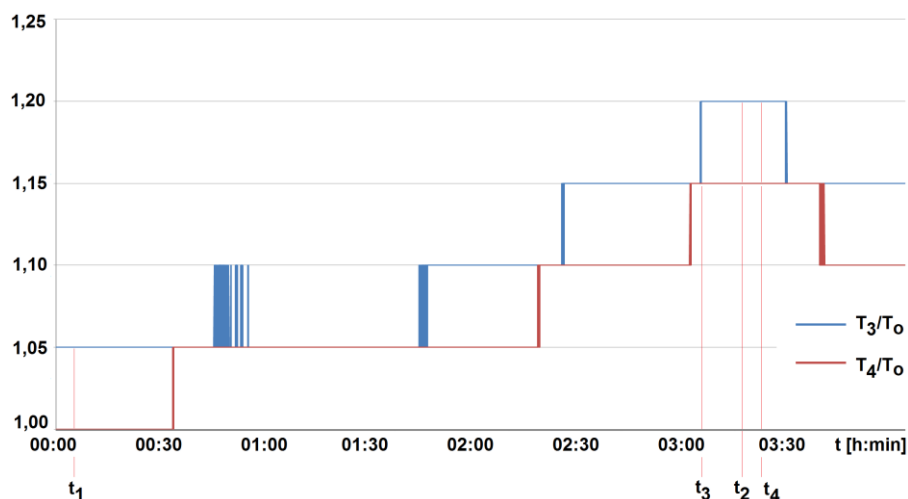
Rys. 8.7. Zmienność napięcia $U_2/U_{\min}$ w czasie dla jednego ogniw obciążonego, nieobciążonej baterii z systemem BMS z aktywnym balansowaniem metodą bateria do ogniw (temperatura pokojowa $T_0 = 20^\circ\text{C}$, chłodzenie swobodne, t_1 , t_2 – moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia 2,5 A, $U_{\min}$ – minimalne napięcie ogniw równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ – minimalne napięcie akumulatora 37,5 V, U_{bat} – napięcie akumulatora (maksymalne 54,75 V), t_3 , t_4 - włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



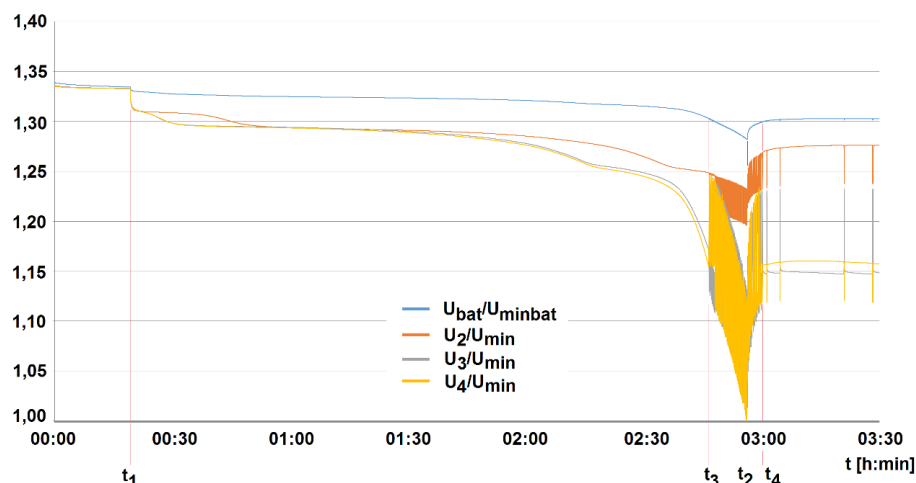
Rys. 8.8. Wykres zmian temperatury na balansowanym ogniwie (temperatura pokojowa $T_0 = 21^\circ\text{C}$), t_1 , t_2 – moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3 , t_4 – włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



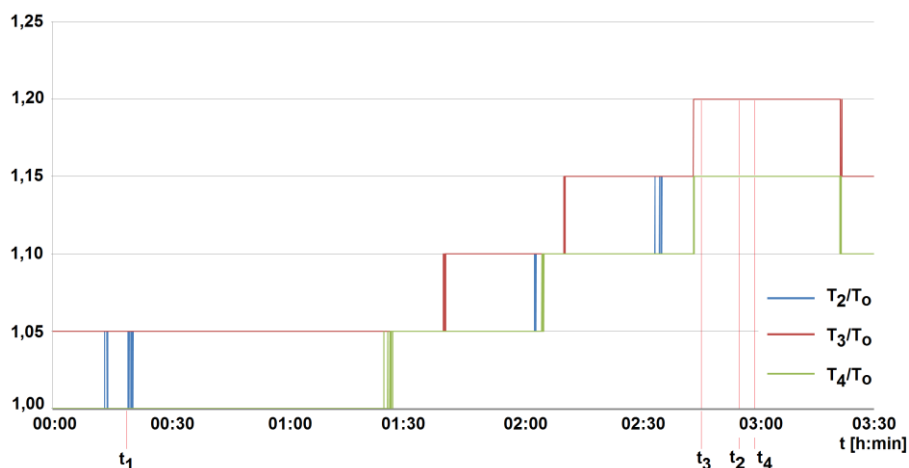
Rys. 8.9. Zmienność napięcia $U_3/U_{\min}$ i $U_4/U_{\min}$ w czasie dla dwóch ogniw obciążonych szeregowo (ogniwa nr 3 i nr 4 - patrz rys. 8.3) nieobciążonej baterii z systemem BMS z aktywnym balansowaniem metodą bateria do ogniwa (temperatura pokojowa $T_0 = 20^\circ\text{C}$), chłodzenie swobodne, t_1 , t_2 – moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia 2,5 A, $U_{\min}$ – minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ – minimalne napięcie akumulatora 37,5 V, U_{bat} – napięcie akumulatora (maksymalne 54,75 V), t_3 , t_4 - włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



Rys. 8.10. Wykres zmian temperatury na balansowanych ogniwach (temperatura pokojowa $T_0 = 21^\circ\text{C}$), t_1 , t_2 – moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3 , t_4 – włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



Rys. 8.11. Zmienność napięcia $U_2/U_{\min}$, $U_3/U_{\min}$ i $U_4/U_{\min}$ w czasie dla trzech ogniw obciążonych szeregowo (ogniwa nr 2, nr 3 i nr 4 - patrz rys. 8.3) nieobciążonej baterii z systemem BMS z aktywnym balansowaniem metodą bateria do ogniwa (temperatura pokojowa $T_0 = 20^\circ\text{C}$, chłodzenie swobodne), t_1 , t_2 – moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia 2,5 A, $U_{\min}$ – minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ – minimalne napięcie akumulatora 37,5 V, U_{bat} – napięcie akumulatora (maksymalne 54,75V), t_3 , t_4 – włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



Rys. 8.12. Wykres zmian temperatury na balansowanych ogniwach (temperatura pokojowa $T_0 = 21^\circ\text{C}$), t_1 , t_2 – moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3 , t_4 – włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania

Przeprowadzone badania stanowiskowe w temperaturze 20°C wykazały, że opracowany aktywny system BMS jest w pełni przydatny do pracy z 15-ogniwowym akumulatorem (o pojemności 10 Ah) wstępnie przeznaczonym do zasilania podwieszonego modelowego górniczego ciągnika akumulatorowego.

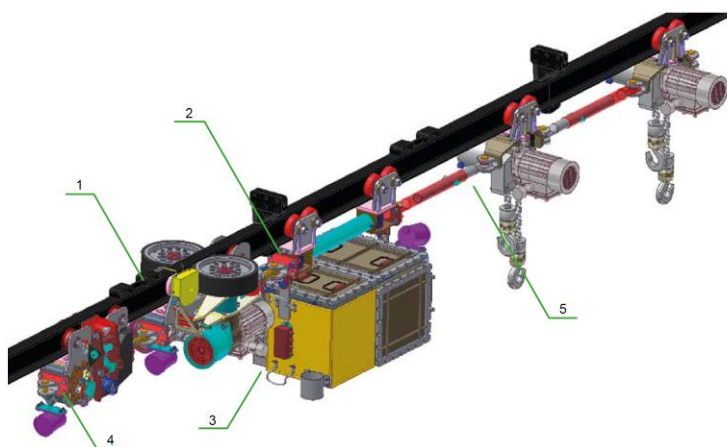
W porównaniu bowiem do pracy bez systemu BMS czas do osiągnięcia wartości minimalnej napięcia ogniw/ogniwa wzrasta istotnie. Wzrost ten zależy od liczby asymetrycznie obciążanych ogniw akumulatora. Dla np. 1 ogniwa (tj. ok. 7% liczby wszystkich ogniw) wzrost czasu t_2 jest ponad 2,5 krotny, zaś napięcie na zaciskach akumulatora U_{bat}/U_{minbat} nie obniża się poniżej 1,3 co widać z porównania krzywych pokazanych na rys. 8.4 i 8.7.

Pomiary temperatury prowadzone w trakcie badań przy chłodzeniu swobodnym nie ujawniły nadmiernego wzrostu temperatury ogniw. W trakcie rozładowania i po balansowaniu obciążonych ogniw różnica ich temperatury przed i po badaniu nie zwiększyła się o więcej niż o około 6°C. Wyniki pomiarów przedstawione zostały na wykresach rys. 8.8, 8.10 i 8.12.

9. Badania przydatności baterii litowej z aktywnym BMS w rzeczywistych warunkach pracy wybranej maszyny górniczej

Po zakończeniu badań stanowiskowych aktywnego systemu balansowania BMS, przeprowadzono dalsze badania sprawdzające jego przydatność do współpracy z akumulatorem dotychczas wykorzystywanym w podwieszanym ciągniku akumulatorowym PCA-1 [45].

Wytypowany do zastosowań ciągnik PCA-1 jest urządzeniem przeznaczonym do transportu ładunków do dwóch ton w warunkach niewielkich nachyleń do 12° w przodkach chodnikowych. Porusza się on po podwieszanej trasie jednoszynowej o profilu trasy jezdnej I 155 z prędkością do 1 m/s oraz charakteryzuje się siłą pociągową do 3,7 kN (rys. 9.1).



Rys. 9.1. Schemat podwieszanego pojazdu akumulatorowego PCA-1

(1 – wózek napędowy; 2- wózek aparaturowy; 3 – moduł zasilający wraz z wyposażeniem elektrycznym; 4 – wózek hamulcowy; 5 – zestaw transportowy)

Posiada zasilanie akumulatorowe, stąd też jego czas pracy jest ograniczony w zasadzie pojemnością ogniw. Urządzenie to przewidziane jest do prac manewrowych (załadowcze, wyładowcze) prowadzonych w wyrobiskach zagrożonych atmosferą wybuchową, w szczególności gazu i/lub pyłu węglowego, co umożliwia jego stosowanie w miejscach, takich jak: koksownie, rafinerie, wytwórnie paliw, farb i lakierów oraz w kopalniach soli, rud oraz węgla. W zakładach górniczych główne zastosowanie ciągnika PCA-1 jest przewidywane w pracach transportowych na odcinku stacja materiałowa – przodek wyrobiska korytarzowego. Podczas drążenia przodka kombajnem chodnikowym znajduje się za nim stacja materiałowa z rozmieszczonymi elementami niezbędnymi do zabudowy wyrobiska chodnikowego. Stacja taka

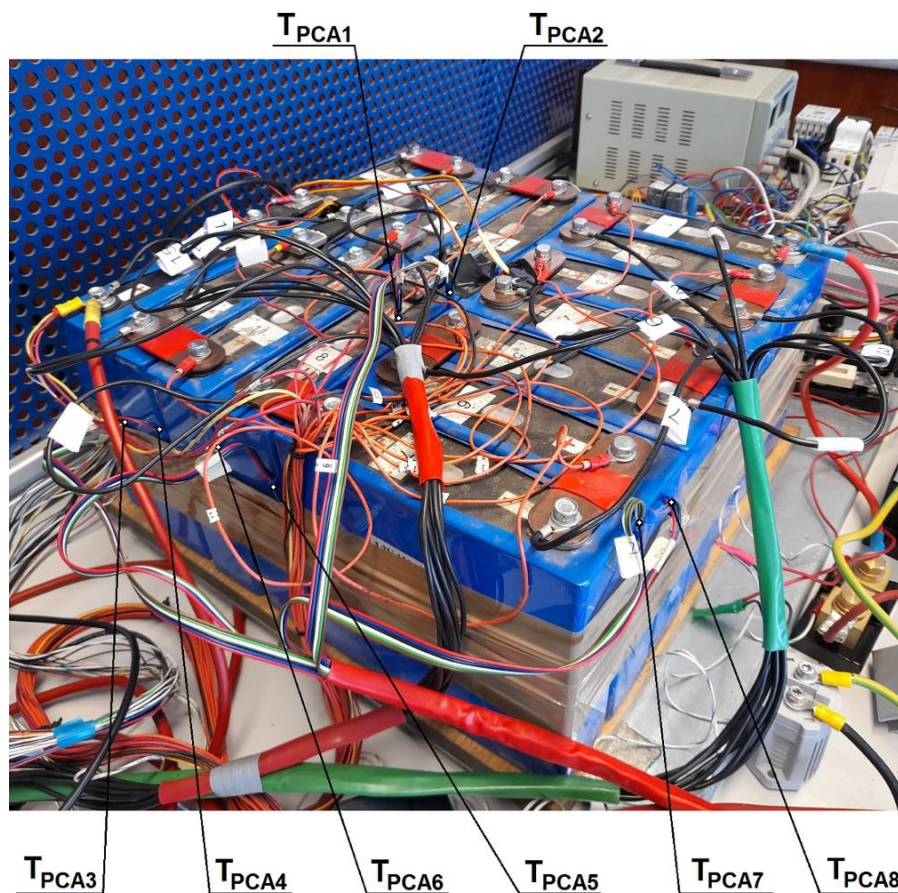
rozciąga się wzdłuż wyrobiska na długości dochodzącej do 200 m. Występujące nagminnie przypadki, w których materiały ze stacji materiałowej (nierzadko elementy o masie przekraczającym 100 kg) donoszone są do przodka ręcznie przez górników. Wymaga to znacznego zaangażowania fizycznego i jest zarówno przyczyną urazów, jak i stwarza zagrożenia dla bezpieczeństwa i zdrowia. Wyrobisko górnicze w strefie przyprzodkowej to środowisko o szczególnie ciężkich warunkach pracy, gdzie występuje podwyższona temperatura, ograniczona przestrzeń oraz duże zapylenie. Zastosowanie więc takiego urządzenia, jakim jest ciągnik PCA-1 w zdecydowany sposób może poprawić warunki klimatyczne i przyczynić się do zwiększenia komfortu pracy. Możliwość ładowania baterii ciągnika w miejscu pracy eliminuje stratę czasu związaną z przejazdem urządzenia do zajezdni w celu doładowania baterii akumulatorowych. Zastosowanie ciągnika wymaga jednak nabycia przez operatorów nowych umiejętności polegających m.in. na każdorazowym podłączeniu ciągnika do źródła ładowania podczas dłuższych postojów. Ciągnik z powodzeniem może być również zastosowany w warsztatach naprawczych. W takich przypadkach nie przewiduje się trudności związanych z ładowaniem akumulatorów. Pełne wykorzystanie możliwości, jakie daje ciągnik PCA-1, będzie miało miejsce, gdy ciągnik będzie przemieszczał się w obrębie całego warsztatu po zawieszanej trasie jednoszynowej.



Rys. 9.2. Widok ogólny zawieszonego pojazdu akumulatorowego PCA-1

Stosowany (do zasilania ciągnika) akumulator złożony jest z piętnastu szeregowo połączonych, ogniw litowo-żelazowo-fosforanowych o napięciu znamionowym 3,2 V, ale każde o znacznie większej pojemności 120 Ah

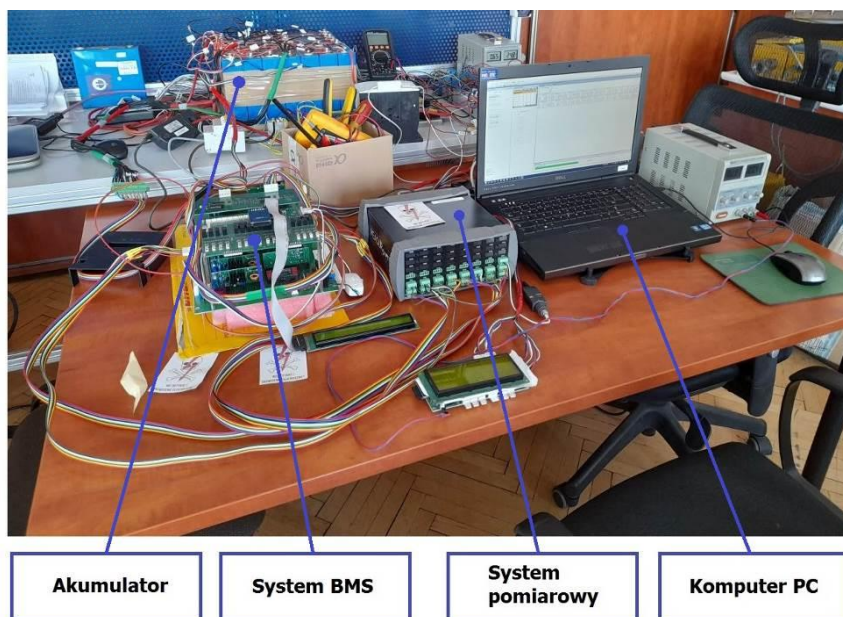
(rys. 9.3 i 9.4). Badano przede wszystkim jego wydajność w temperaturze pokojowej (około $+20^{\circ}\text{C}$, wilgotność 40%) przy swobodnej wymianie ciepła z akumulatora do otoczenia. Badania wykonano zarówno dla akumulatora pracującego na biegu jałowym, jak i podczas jego obciążenia prądowego. Widok stanowiska badawczego wyposażonego zarówno w system pomiaru temperatury i napięcia (system rejestracji danych DT8873-24 VOLT), jak i komputer ze specjalizowanym oprogramowaniem przedstawiono na rys. 9.5.



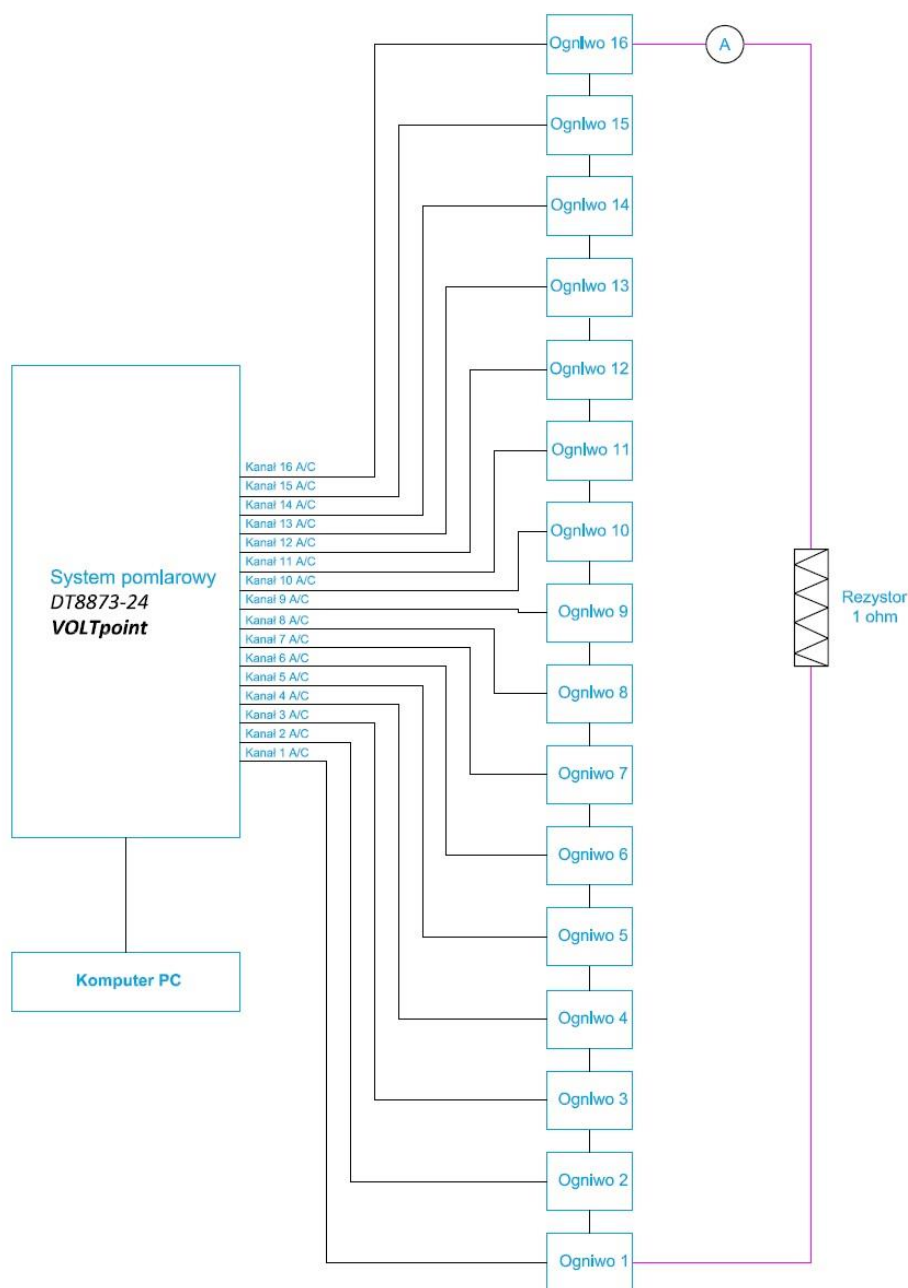
Rys. 9.3. Akumulator złożony z ogniw 120 Ah litowo-żelazowo-fosforanowych używany w podwieszanym ciągniku akumulatorowym PCA-1, z rozmieszczonymi czujnikami temperatury



Rys. 9.4. Ogniwo LiFePO_4 120Ah (litowo-żelazowo-fosforanowe) o pojemności 120 Ah stosowane w podwieszanym ciągniku akumulatorowym PCA-1



Rys. 9.5. Stanowisko badawcze



Rys. 9.6. Schemat blokowy układu testowania ogniw używanych w PCA-1 dla badanego akumulatora z podłączonym aktywnym systemem BMS

Założono, że w rzeczywistych warunkach pracy ogniwa, co prawda nie są jednakowo obciążone, ale wzięto pod uwagę najwyższy prąd obciążenia akumulatora równy 53 A, tj. około 45% wartości standardowego prądu

rozładowania szeregowo połączonych ogniw. Podczas badania rejestrowane były zmiany temperatury w wybranych miejscach akumulatora. Oczywistym jest, że w rzeczywistych warunkach pracy zmienność w czasie wartości napięcia ogniwa i przebiegu nagrzewania może mieć bardzo różny charakter. Przed rozpoczęciem więc badań ogniwa w pełni naładowano, a testy kontynuowano do momentu, gdy napięcie spadło do wartości minimalnej (2,5 V). Podczas obciążenia akumulatora prąd był praktycznie stały w czasie (niezależnie od nastawionych wartości) i zaczął maleć w znaczący sposób dopiero wtedy, gdy napięcie ogniwa spadało do wartości bliskiej minimum ($U_{\min} = 2,5 \text{ V}$).

W celu przetestowania więc skuteczności balansowania aktywnego systemu BMS, akumulatora pod obciążeniem prądowym równym 53 A został do jego zacisków przyłączony rezystor dużej mocy o oporze 1Ω tak jak pokazano na rys. 9.6. Wszystkie ogniwa były ładowane wspólnie z jednej ładowarki. Kontrolowano zarówno napięcie, temperaturę w wybranych miejscach akumulatora oraz prąd rozładowania i ładowania.

Każde przeprowadzone badanie było inicjowane dla w pełni naładowanego akumulatora (napięcia na wszystkich ogniwach było równe znamionowemu $U_n = 3,2 \text{ V}$).

System BMS tak jak podczas wszystkich dotychczasowych badań rozpoczynał balansowanie, po wykryciu obniżenia się wartości napięcia ogniwa poniżej 3,05 V, natomiast przerywał balansowanie, gdy napięcie na wszystkich ogniwach było mniejsze niż 2,55 V lub gdy napięcie na którymkolwiek z ogniw było mniejsze niż 2,5 V lub większe niż 3,65 V. Wartość prądu balansowania była stała i równa 2 A.

Przeprowadzone badania wykazały, że zarówno wartości napięć tego samego typu ogniw, jak i ich temperatura mogą różnić się od siebie nawet podczas obciążenia (rozładowania) tą samą wartością prądu. Uzasadnia to znaczenie korzystania z odpowiedniego aktywnego systemu BMS.

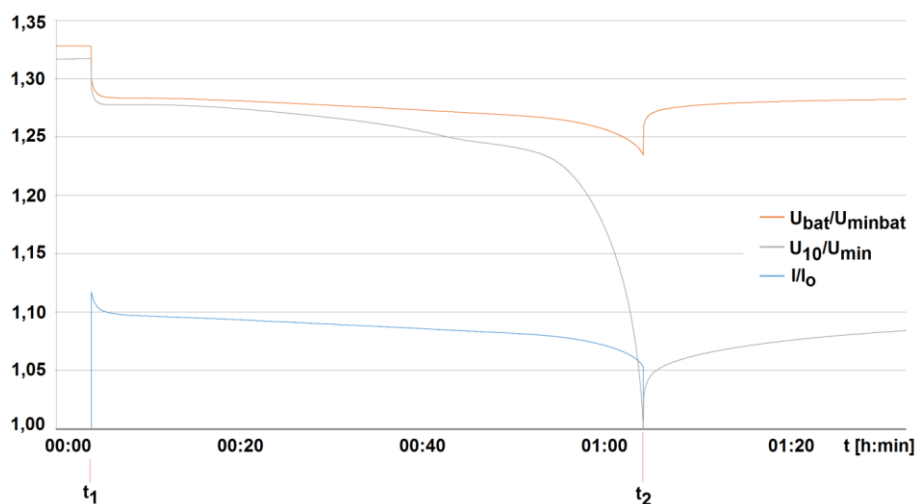
Wyniki badań

Podczas badań, aby porównać efektywność opracowanego aktywnego systemu BMS (metodą bateria do ogniwa), jego parametry techniczne zostały również odpowiednio dopasowane tak, aby balansowanie aktywowało się, gdy napięcie któregośkolwiek z ogniw spadnie poniżej 95% wartości znamionowej, tj. wartość U_n poniżej 3,05 V. Balansowanie jest następnie wyłączane, gdy napięcie jest niższe niż minimalna wartość $U_{\min}$ ($U_{\min} = 2,5 \text{ V}$) lub wyższe niż $U/U_n = 1,14$ (3,65 V). Wartość prądu balansującego ustalono jednak tak jak dotychczas na 2 A.

Z przeprowadzonych badań wynika, że użycie opracowanego aktywnego systemu BMS, a zaprojektowanego do pracy z akumulatorem o ponad 10-

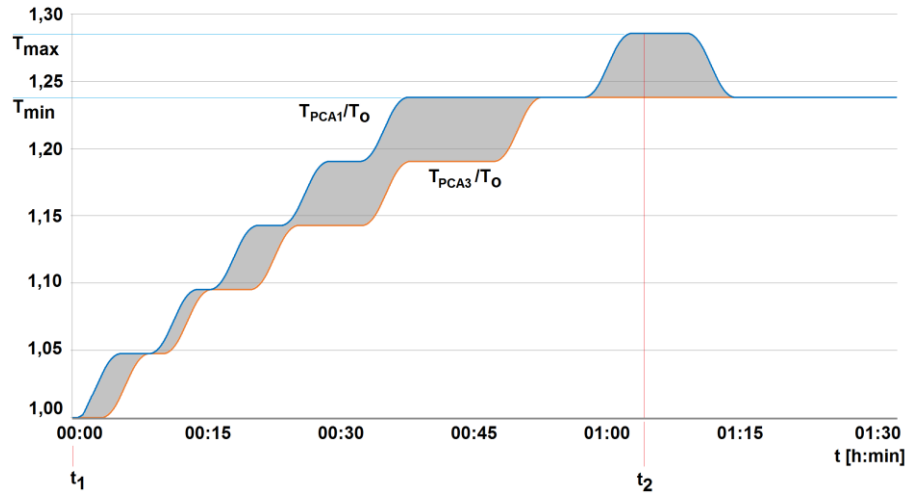
krotnie mniejszej pojemności daje tylko niewielki efekt. W minimalnym bowiem tylko stopniu wpływa na wydłużenie się czasu t_2 rozładowania akumulatora w porównaniu do pracy bez systemu BMS (rys. 9.7). Wynika to oczywiście ze zbyt małej wartości prądu układu balansującego w stosunku do pojemności zastosowanych ogniw (120 Ah). Natomiast wpływ aktywnego systemu BMS na wartość napięcia na zaciskach akumulatora widoczny jest wyraźnie po odłączeniu obciążenia. Przy małej wartości prądu balansowania równej 2 A trwa to niestety jednak dość długo (rys. 9.7, 9.8, 9.9, 9.10). Nie mniej wpływa to na zwiększenie trwałości akumulatora.

Wpływ temperatury otoczenia przy chłodzeniu swobodnym, nie powoduje nadmiernego wzrostu temperatury ogniw. W trakcie rozładowania i po balansowaniu obciążonego akumulatora różnica temperatury przed i po badaniu nie zwiększyła się o więcej niż o około 7°C. Na wykresach rys. 9.8 i 9.13 przedstawiono dla przykładu zmiany temperatury akumulatora w czasie, podczas rozładowywania akumulatora w różnych punktach pomiarowych ($T_{PCA1} \dots T_{PCA8}$) podczas obciążenia prądem 53 A (około 45% wartości standardowego rozładowania), bez podłączonego i z podłączonym aktywnym systemem BMS.

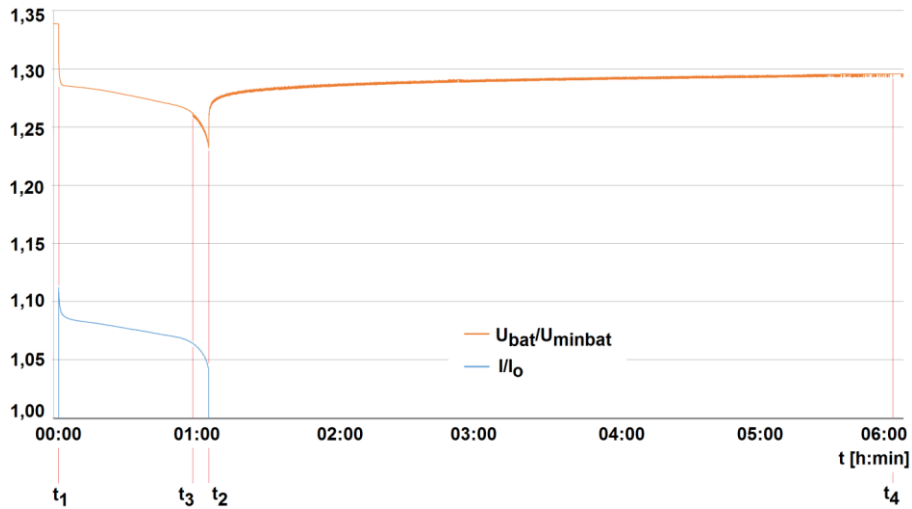


Rys. 9.7. Zmiana wartości napięcia $U_{10}/U_{\min}$ w czasie dla najsłabszego ogniwa (które pierwsze osiągnęło napięcie 2,5 V) w akumulatorze zbudowanym z 15 szeregowo połączonych ogniw, bez systemu BMS (temperatura pokojowa $T_o = 21^\circ\text{C}$, chłodzenie swobodne,) t_1 , t_2 - moment włączenia i wyłączenia obciążenia akumulatora,

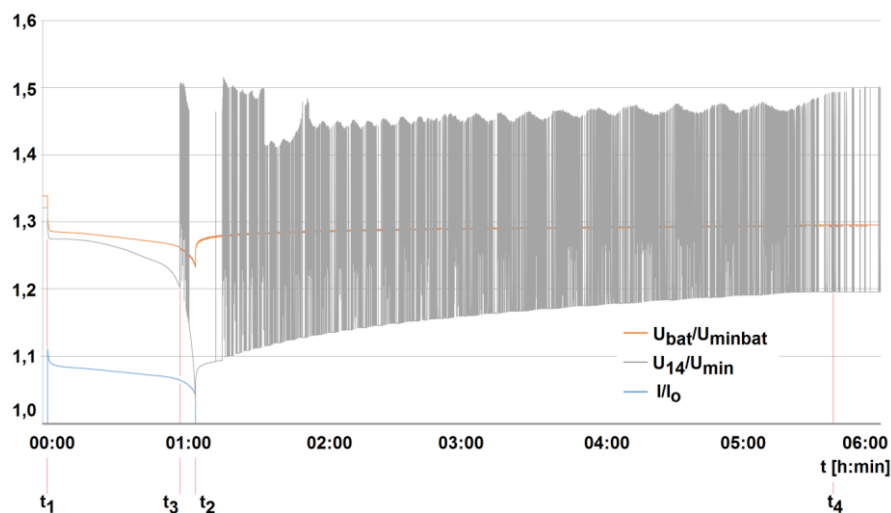
$U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora 37,5 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 54,75 V), I - prąd obciążenia akumulatora, I_o - prąd odniesienia 50 A



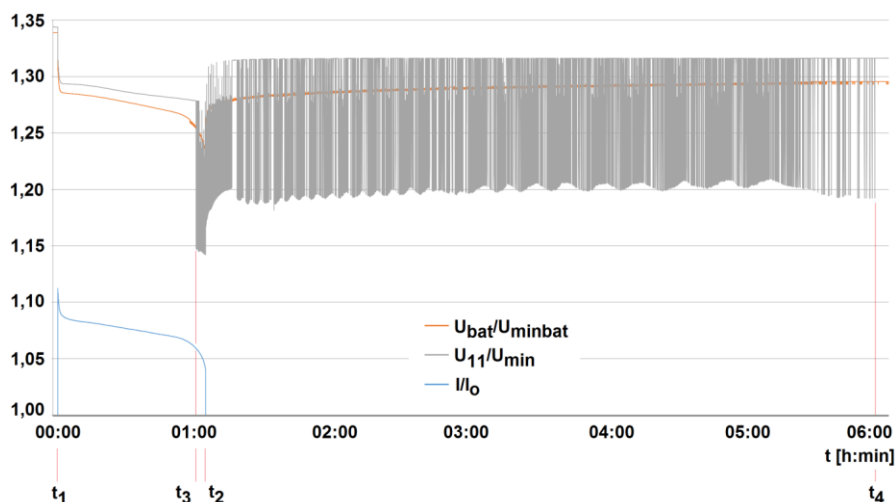
Rys. 9.8. Zmiana wartości temperatury w wybranych miejscach akumulatora podczas jego obciążenia prądem 53 A (około 45% wartości standardowego rozładowania), bez podłączonego systemu BMS, temperatura pokojowa $T_0 = 21^\circ\text{C}$



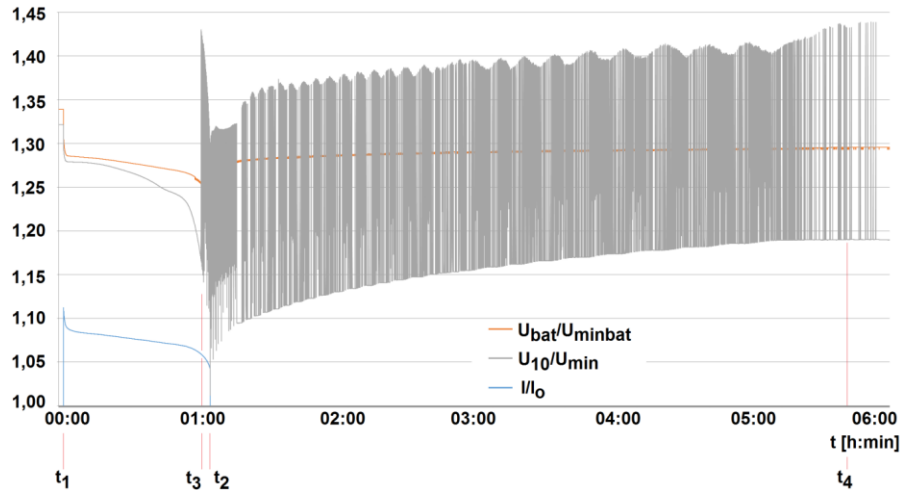
Rys. 9.9. Zmienność napięcia U_{bat}/U_{minbat} w czasie na zaciskach obciążonego akumulatora współpracującego z aktywnym BMS balansowaniem metodą bateria do ogniwa (temperatura pokojowa $T_0 = 20^\circ\text{C}$, chłodzenie swobodne), t_1 , t_2 – moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia akumulatora; U_{min} – minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, U_{minbat} – minimalne napięcie akumulatora 37,5 V, U_{bat} – napięcie akumulatora (maksymalne 54,75 V), t_3 , t_4 - włączenie i wyłączenie aktywnego balansowania, I - prąd obciążenia akumulatora, I_0 – prąd odniesienia 50 A



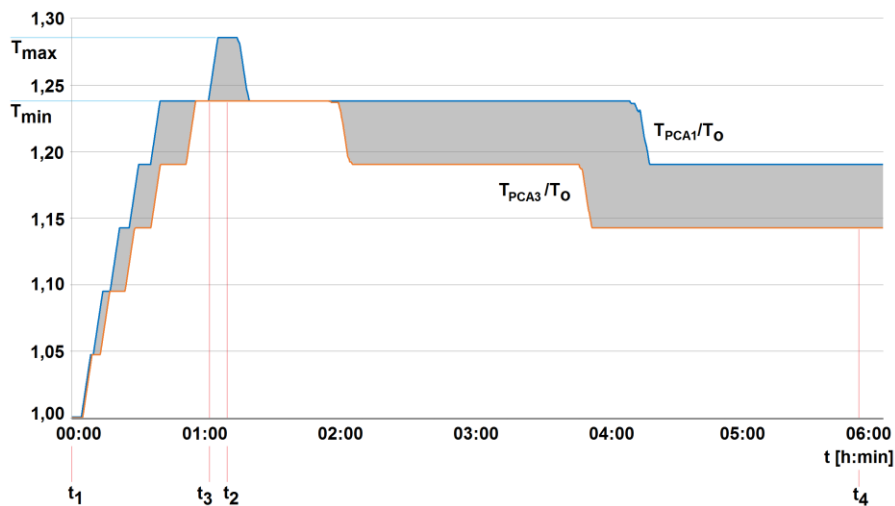
Rys. 9.10. Zmienność napięcia U_{14}/U_{min} w czasie dla najsłabszego ogniwa (nr 14), obciążonego akumulatora z systemem BMS z aktywnym balansowaniem metodą baterii do ogniwa (temperatura pokojowa $T_o = 20^{\circ}\text{C}$, chłodzenie swobodne), t_1 , t_2 – moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia; U_{min} – minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, U_{minbat} – minimalne napięcie akumulatora 37,5 V, U_{bat} – napięcie akumulatora (maksymalne 54,75 V), t_3 , t_4 - włączanie i wyłączanie aktywnego balansowania, I - prąd obciążenia akumulatora, I_o – prąd odniesienia 50 A



Rys. 9.11. Zmienność napięcia U_{11}/U_{min} w czasie dla słabszego (nr 11) balansowanego ogniwa, obciążonego akumulatora z systemem BMS z aktywnym balansowaniem metodą baterii do ogniwa (temperatura pokojowa $T_o = 20^{\circ}\text{C}$, chłodzenie swobodne), t_1 , t_2 – moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, U_{min} – minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, U_{minbat} – minimalne napięcie akumulatora 37,5 V, U_{bat} – napięcie akumulatora (maksymalne 54,75 V), t_3 , t_4 - włączanie i wyłączanie aktywnego balansowania, I - prąd obciążenia akumulatora, I_o – prąd odniesienia 50 A



Rys. 9.12. Zmienność napięcia $U_{10}/U_{\min}$ w czasie dla innego słabszego (nr 10) balansowanego ogniwa, obciążonego akumulatora z systemem BMS z aktywnym balansowaniem metodą bateria do ogniwa (temperatura pokojowa $T_o = 20^\circ\text{C}$, chłodzenie swobodne), t_1 , t_2 – moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, $U_{\min}$ – minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ – minimalne napięcie akumulatora 37,5 V, U_{bat} – napięcie akumulatora (maksymalne 54,75 V), t_3 , t_4 – włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania, I – prąd obciążenia akumulatora, I_o – prąd odniesienia 50 A



Rys. 9.13. Zmiany temperatury w czasie w wybranych punktach na obudowie akumulatora, podczas jego obciążenia prądem 53 A (około 45% wartości standardowego rozładowania) z podłączonym aktywnym systemem BMS, temperatura pokojowa $T_o = 21^\circ\text{C}$, t_1 , t_2 – moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3 , t_4 – włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania

Widoczne na wykresach skokowe zmiany wartości pomierzonej temperatury wynikają z rozdzielczości zastosowanego przetwornika analogowo-cyfrowego, co nie zmienia wniosków z badań.

9.1. Analiza uzyskanych wyników badań

Uzyskanie przydatnego aktywnego systemu BMS do współpracy z akumulatorem litowo-żelazowo-fosforanowym (LiFePO_4) wymaga między innymi doboru odpowiedniej wartości prądu balansowania w zależności od pojemności zastosowanych ogniw. Z przeprowadzonych badań wynika, że dobre efekty uzyskuje się, gdy prąd balansowania jest równy około 20% ich pojemności. Badając balansowanie aktywnych systemów BMS używane były ogniwa o pojemności 10 Ah. Biorąc pod uwagę fakt, że wartość prądu balansowania wynosiła 2 A, czyli 20% ich pojemności, a uzyskane efekty były dobre, to przyjęto, że przy użyciu ogniw o większej (innej) pojemności, ale przy tej samej wartości prądu balansowania (czyli 20% w stosunku do pojemności ogniw) efekty powinny być podobne. Oczywiście jest to tylko hipoteza, która dla innych pojemności ogniw wymaga sprawdzenia. Natomiast dla mniejszych zaś wartości tego prądu czas balansowania akumulatora odpowiednio się wydłuża. W temperaturze pokojowej przy swobodnej wymianie ciepła z otoczeniem i dla małej wartości (2 A) prądu balansowania nagrzewanie się akumulatora o pojemności 120 Ah jest mało znaczące.

10. Wnioski szczegółowe

Celem przeprowadzonych badań była ocena możliwości efektywnej i bezpiecznej wymiany akumulatorów ołowiowych na litowe w układzie zasilania wybranego podwieszanego pojazdu górniczego. Pozwoliłoby to na wydłużenie czasu pracy silnika przy znacznie obniżonej masie i przy spełnieniu wszystkich wymagań dotyczących bezpieczeństwa pracy w podziemnej kopalni węgla kamiennego z zagrożeniem pożarem pyłu i/lub wybuchem metanu. Z aktualnie dostępnych na rynku akumulatorów litowych wybrano akumulatory litowo-żelazowo-fosforanowe. Charakteryzują się najwyższą niezawodnością eksploatacyjną potwierdzoną w warunkach eksploatacji górniczej, stwarzając najmniejsze ryzyko pożaru i/lub wybuchu. Z tego powodu zostały one formalnie dopuszczone do użytku w kopalniach przez nadrzędną kontrolującą instytucję górniczą. Powszechnie wiadomo, że wzrost wartości temperatury ogniwi litowo-żelazowo-fosforanowych jest szczególnie znaczący w warunkach ich przeciążenia. W związku z tym w praktyce takie przypadki są eliminowane dzięki zastosowaniu odpowiednich zabezpieczeń. Należy jednak stwierdzić, że ryzykowny wzrost temperatury ogniwa może występować również w niezbyt zakłóconych warunkach pracy. Dotyczy to zwłaszcza, wydawało by się, nieistotnych zagrożeń w razie przypadkowych, cyklicznych, niewielkich przeciążeń i rozładowań ogniwi. Jest to szczególnie ważne podczas ciężkich prac górniczych, zwłaszcza gdy odprowadzanie ciepła do otoczenia jest znacznie ograniczone. Taki przypadek może mieć duże znaczenie w analizowanej aplikacji. Badania więc wykonano zarówno dla pojedynczych ogniwi litowo-żelazowo-fosforanowych, jak i akumulatora z nich zbudowanego. Miały one ponadto na celu porównanie efektywności pracy przedmiotowych baterii ogniwi z wybranymi układami balansowania pasywnego i aktywnego.

Przeprowadzone badania wykazały, że praca badanych ogniwi w warunkach pokojowych ze swobodną wymianą ciepła nie stwarza zagrożeń, jeżeli prąd rozładowania (obciążenia) nie przekracza 50% wartości standardowej. Temperatura ogniwa rośnie wówczas wykładniczo wraz z wartością prądu. Jednak po osiągnięciu minimalnej wartości napięcia $U_{\min}$ nie przekracza ona $+30^{\circ}\text{C}$. Jest to wartość akceptowana przez producenta. Oczywiście wraz ze wzrostem wartości prądu obciążenia czas trwania rozładowania się ogniwa zmniejsza się prawie liniowo. Podwyższona temperatura otoczenia od $+5^{\circ}\text{C}$ do $+60^{\circ}\text{C}$ wymusza temperaturę ogniwa na tym samym poziomie. Należy podkreślić, że dla temperatury otoczenia z zakresu $+20^{\circ}\text{C}$ $+60^{\circ}\text{C}$ praktycznie nie stwierdzono jej istotnego wpływu, na wartość i czas obniżania się napięcia, jeśli prąd nie przekraczał 40% wartości standardowych. Wręcz przeciwnie, przy obniżonej temperaturze otoczenia czas rozładowania ulega skróceniu. Np. obniżenie temperatury z $+20^{\circ}\text{C}$ do $+5^{\circ}\text{C}$ skraca ten czas o około 10%.

Niewielkie jednorazowe przeładowania (do około 20% napięcia) i przypadkowe krótkotrwałe głębokie rozładowania (do około 10% napięcia i prąd poniżej 50% prądu standardowego) nie stanowią większego zagrożenia. Jest to tym ważniejsze, że ogniwa pracują efektywniej w górnym zakresie temperatur (do $+65^{\circ}\text{C}$). Takie przypadki należy jednak dokładnie kontrolować i im zapobiegać, gdyż ich powtarzanie prowadzi do znacznego wzrostu temperatury ogniwa powyżej wartości dopuszczalnej. Wynika to między innymi z dużej bezwładności cieplnej testowanych ogniw. Dlatego też badane ogniwa nadają się do zastosowania jako źródło zasilania wybranych maszyn górniczych, ale tylko jeśli wyposażone są w efektywny system zarządzania baterią (BMS).

W kolejnych badaniach zostały użyte akumulatory, składające się z ośmiu szeregowo połączonych ogniw litowo-żelazowo-fosforowych (LiFePO_4) o napięciu znamionowym 3,2 V i pojemności $C=10$ Ah. Producent zaleca, aby prąd ładowania akumulatorów nie przekraczał $2C$, a rozładowania $3C$. Temperatura pracy nie powinna przekroczyć 65°C . Badania przeprowadzono więc obciążając (rozładowując) baterie stałą wartością prądu równą 2,5 A.

Przeprowadzone badania zostały podzielone na dwie części. Pierwsza dotyczyła badań stanowiskowych, a druga badań w komorze klimatycznej.

Badania stanowiskowe polegały na rozładowaniu pojedynczego jednego, dwóch i trzech ogniw do minimalnej wartości granicznej podanej przez producenta i balansowaniu wszystkich ogniw w akumulatorach. W badaniach tych były użyte trzy systemy BMS: dwa aktywne i jeden pasywny.

Podczas badań zauważalna była różnica w działaniu aktywnych systemów BMS w stosunku do pasywnego. Mianowicie w momencie podłączenia obciążenia, gdy napięcie na ogniwie spadło poniżej ustawionej granicy (3,05 V), oba aktywne systemy BMS załączały balansowanie i najsłabsze ogniwa były doładowywane. Taka sytuacja powodowała wydłużanie czasu działania całej baterii akumulatorowej. Natomiast w przypadku pasywnego systemu BMS ogniwo było doładowywane dopiero podczas ładowania całego akumulatora. Dlatego czas działania akumulatora z pasywnym systemem jest krótszy.

Badania w komorze klimatycznej dotyczyły wyłącznie aktywnych systemów BMS i zostały wykonane dla temperatur: $+5^{\circ}\text{C}$, $+20^{\circ}\text{C}$, $+45^{\circ}\text{C}$, $+60^{\circ}\text{C}$ i wilgotności 75%. Miały one na celu sprawdzenie, czy i jaki wpływ na temperaturę pracy ogniw litowych mają różne warunki środowiskowe.

Z badań wynika, że podczas normalnej eksploatacji akumulatorów litowych tzn., gdy wartości napięć minimalnego i maksymalnego są zgodne z podanymi przez producenta, temperatura na obudowie ogniwa nie wzrasta znacząco, pomimo różnych temperatur ustalonych podczas badania w komorze klimatycznej.

Najkorzystniejszym wydaje się być system BMS z aktywnym balansowaniem metodą bateria do ogniwa, ponieważ najdłużej utrzymywał on napięcie powyżej minimalnego na rozładowywanym ogniwie. Taka sytuacja jest korzystna dla użytkownika, gdyż wydłuża eksploatację akumulatora bez konieczności przerywania pracy na czas ładowania.

Na podstawie uzyskanych wyników badań stanowiskowych oraz w komorze klimatycznej, zaprojektowano i wykonano następnie (do badań stanowiskowych-laboratoryjnych) aktywny system BMS bazujący na metodzie bateria do ogniwa i współpracujący z akumulatorem składającym się z 15 szeregowo połączonych ogniw litowo-żelazowo-fosforanowych o napięciu znamionowym 3,2 V i pojemności 10 Ah typu Headway LFP38120. Badania były wykonywane w temperaturze pokojowej (około + 20°C, wilgotność 40%) przy swobodnym oddawaniu ciepła z akumulatora do otoczenia.

W celu określenia skuteczności balansowania aktywnego systemu BMS, przeprowadzono badania efektywności jego pracy podczas asymetrycznego obciążania ogniw w baterii akumulatorowej. W tym celu wybrano losowo (dla baterii nieobciążonej) ograniczoną liczbę ogniw (od 1 do 3, czyli od 7% do 20% całkowitej liczby ogniw) do niezależnego ładowania/rozładowywania oraz przyjęto prąd obciążenia równy 2,5 A, co stanowi 25% wartości standardowego prądu rozładowania ogniwa. W trakcie badań monitorowano zarówno napięcie ogniw, jak i całej baterii akumulatorowej oraz ich temperaturę.

Każde poszczególne badanie było inicjowane dla w pełni naładowanego akumulatora (wartość napięcia wszystkich ogniw była równa znamionowemu $U_n = 3,2$ V).

Balansowanie systemu BMS uaktywnia się po wykryciu na ogniwie napięcia poniżej 3,05 V. Jego zakończenie zaś następuje, gdy napięcie na wszystkich ogniwach jest mniejsze niż 2,55 V lub gdy napięcie na którymkolwiek ogniwie jest mniejsze niż 2,5 V lub większe niż 3,65 V. Wartość prądu balansowania jest stała i wynosi 2 A.

Rozładowanie ogniwa/ogniw (prądem 2,5 A) trwało do momentu, gdy napięcie któregośkolwiek z ogniw osiągnęło minimalną wartość ($U_{\min} = 2,5$ V) podaną przez producenta. Przeprowadzone badania wykazały, że zarówno wartości napięć tego samego typu ogniw, jak i ich temperatura mogą różnić się od siebie nawet podczas ich obciążania (rozładowania) tą samą wartością prądu. Uzasadnia to bezwzględną potrzebę korzystania z odpowiedniego aktywnego systemu BMS.

Podczas przeprowadzonych badań, aby porównać wydajność opracowanego aktywnego systemu BMS (metodą bateria do ogniwa), parametry techniczne zostały odpowiednio dopasowane tak, aby balansowanie aktywowało się, gdy napięcie któregośkolwiek z ogniw spadnie poniżej 95% wartości znamionowej, tj. wartość U_n poniżej 3,05 V. Balansowanie jest

wyłączane, gdy napięcie jest niższe niż minimalna wartość $U_{\min}$ ($U_{\min} = 2,5$ V) lub wyższe niż $U/U_n = 1,14$ (3,65 V). Wartość prądu balansującego ustalono na 2 A (około 40% standardowego prądu ładowania).

Z przeprowadzonych badań wynika, że zastosowanie opracowanego aktywnego systemu BMS wydłuża czas rozładowania akumulatora t_2 na jednym (pojedynczym) ładowaniu w porównaniu do pracy bez systemu BMS. W związku z tym żywotność baterii zwiększa się odpowiednio.

Wydłużenie żywotności baterii na jednym ładowaniu może być znaczące i wielokrotnie przekraczać czas rozładowania t_2 , w porównaniu do pracy bez systemu BMS.

Przeprowadzone badania stanowiskowe w temperaturze 20°C wykazały, że opracowany aktywny system BMS jest w pełni przydatny do pracy z 15-ogniowym akumulatorem przeznaczonym do zasilania podwieszonego modelowego górniczego ciągnika akumulatorowego. W porównaniu bowiem do pracy bez systemu BMS czas do osiągnięcia wartości minimalnej napięcia ogniów/ogniwa wzrasta istotnie. Zależy to od liczby asymetrycznie obciążanych ogniów akumulatora. Dla np. 1 ogniwa (tj. ok. 7% liczby wszystkich ogniów) wzrost czasu t_2 jest ponad 2,5-krotny, zaś napięcie na zaciskach akumulatora $U_{bat}/U_{\min bat}$ nie obniża się poniżej 1,3.

Po zakończeniu badań stanowiskowych-laboratoryjnych aktywnego systemu balansowania BMS, przeprowadzono dalsze badania sprawdzające jego przydatność do współpracy z akumulatorem dotychczas wykorzystywanym w podwieszanym ciągniku akumulatorowym PCA-1. Akumulator stosowany do zasilania ciągnika, złożony jest z piętnastu szeregowo połączonych ogniów litowo-żelazowo-fosforanowych o napięciu znamionowym 3,2 V, ale o znacznie większej pojemności tj. 120 Ah. Badano przede wszystkim jego wydajność w temperaturze pokojowej (około + 20°C, wilgotność 40%) przy swobodnej wymianie ciepła z akumulatora do otoczenia. Badania wykonano zarówno dla akumulatora pracującego na biegu jałowym, jak i podczas jego obciążenia prądowego.

Założono, że w rzeczywistych warunkach pracy ogniwa, co prawda nie są jednakowo obciążone, ale wzięto pod uwagę najwyższy prąd obciążenia akumulatora równy 53 A, tj. około 45% wartości standardowego prądu rozładowania szeregowo połączonych ogniów. Podczas badania rejestrowane były zmiany temperatury w wybranych miejscach akumulatora. Należy zaznaczyć, że w rzeczywistych warunkach pracy zmienność w czasie wartości napięcia ogniwa i przebiegu nagrzewania może mieć bardzo różny charakter. Przed rozpoczęciem więc badań ogniwa w pełni naładowano, a testy kontynuowano do momentu, gdy napięcie spadło do wartości minimalnej (2,5 V). Podczas obciążenia akumulatora prąd był praktycznie stały w czasie (niezależnie od nastawionych wartości) i zaczął maleć w znaczący sposób

dopiero wtedy, gdy napięcie ogniwa spadało do wartości bliskiej minimum ($U_{\min} = 2,5 \text{ V}$).

W celu przetestowania więc skuteczności balansowania aktywnego systemu BMS, akumulatora pod obciążeniem prądowym równym 53 A został do jego zacisków przyłączony rezystor dużej mocy o oporze 1Ω . Kontrolowano zarówno napięcie, temperaturę w wybranych miejscach akumulatora oraz prąd rozładowania.

Każde przeprowadzone badanie było inicjowane dla w pełni naładowanego akumulatora (napięcia na wszystkich ogniwach było równe znamionowemu $U_n = 3,2 \text{ V}$).

System BMS tak jak podczas wszystkich dotychczasowych badań rozpoczynał balansowanie, po wykryciu obniżenia się wartości napięcia ogniwa poniżej 3,05 V, natomiast przerywał balansowanie, gdy napięcie na wszystkich ogniwach było mniejsze niż 2,55 V lub gdy napięcie na którymkolwiek z ogniw było mniejsze niż 2,5 V lub większe niż 3,65 V. Wartość prądu balansowania była stała i równa 2 A.

Przeprowadzone badania wykazały, że zarówno wartości napięć tego samego typu ogniw, jak i ich temperatura mogą różnić się od siebie nawet podczas obciążenia (rozładowania) tą samą wartością prądu. Uzasadnia to znaczenie korzystania z odpowiedniego aktywnego systemu BMS.

Podczas badań, aby porównać efektywność opracowanego aktywnego systemu BMS (metodą bateria do ogniwa), jego parametry techniczne zostały również odpowiednio dopasowane tak, aby balansowanie aktywowało się, gdy napięcie któregośkolwiek z ogniw spadnie poniżej 95% wartości znamionowej, tj. wartość U_n poniżej 3,05 V. Balansowanie jest następnie wyłączane, gdy napięcie jest niższe niż minimalna wartość $U_{\min}$ ($U_{\min} = 2,5 \text{ V}$) lub wyższe niż $U/U_n = 1,14$ (3,65 V). Wartość prądu balansującego ustalono na 2 A (około 1,6% standardowego prądu ładowania).

Z przeprowadzonych badań wynika, że użycie opracowanego aktywnego systemu BMS, a zaprojektowanego do pracy z akumulatorem o ponad 10-krotnie mniejszej pojemności daje tylko niewielki efekt. W minimalnym bowiem tylko stopniu wpływa na wydłużenie się czasu t_2 rozładowania akumulatora w porównaniu do pracy bez BMS. Wynika to oczywiście ze zbyt małej wartości prądu układu balansującego w stosunku do pojemności zastosowanych ogniw (120 Ah). Natomiast wpływ aktywnego systemu BMS na wartość napięcia na zaciskach akumulatora widoczny jest wyraźnie po odłączeniu obciążenia. Przy małej wartości prądu balansowania równej 2 A trwa to niestety dość długo, ale jednak wpływa to na zwiększenie trwałości akumulatora.

Wpływ temperatury otoczenia przy chłodzeniu swobodnym, nie powoduje nadmiernego wzrostu temperatury ogniw. W trakcie rozładowania i po balansowaniu obciążonego akumulatora różnica temperatury przed i po badaniu nie zwiększyła się o więcej niż o około 7°C.

Uzyskanie odpowiednio dostosowanego aktywnego systemu BMS do współpracy z akumulatorem litowo-żelazowo-fosforowym (LiFePO_4) wymaga między innymi doboru odpowiedniej wartości prądu balansowania w zależności od pojemności zastosowanych ogniw. Z przeprowadzonych badań wynika, że dobre efekty uzyskuje się, gdy prąd balansowania jest równy około 20% ich pojemności. Dla mniejszych zaś wartości tego prądu czas balansowania akumulatora odpowiednio się wydłuża. W temperaturze pokojowej przy swobodnej wymianie ciepła z otoczeniem i dla małej wartości (2 A) prądu balansowania nagrzewanie się akumulatora o pojemności 120 Ah jest mało znaczące.

Badania wykazały również, że główne zagrożenie związane z przekroczeniem dopuszczalnej temperatury podanej przez producenta dla ogniw litowych podczas normalnej eksploatacji, nie wystąpiło. Wszystkie badania przeprowadzono dla trzech baterii ogniw tego samego typu. Każdy punkt pomiarowy wykonano 5-krotnie, obliczając wartości średnie z poziomem ufności 0,95 za pomocą testu Studenta [46].

11. Wnioski końcowe i podsumowanie

Biorąc pod uwagę zarówno oczekiwania kopalń węgla kamiennego w zakresie wdrażania rozwiązań technicznych, pozwalających na spełnienie wymagań jakościowych, wydajnościowych i ekonomicznych oraz wzrost warunków bezpieczeństwa pracy, jak i znaczną redukcję masy, zdecydowano się rozważyć możliwość efektywnego i bezpiecznego stosowania akumulatorów litowo-żelazowo-fosforanowych w podwieszanym pojeździe górniczym.

Na podstawie wyników wstępnych badań dotyczących możliwości zastosowania ogniw litowych w maszynach i urządzeniach górniczych (np. GAD) zdecydowano, że jako źródło zasilania pojazdów akumulatorowych PCA-1 zostanie wybrany akumulator litowo-żelazowo-fosforanowy składający się z dobranej, w zależności od mocy silnika, liczby ogniw połączonych szeregowo o odpowiedniej pojemności.

Istnieje wiele odmian układów balansujących ogniw, mogących współpracować z akumulatorami stosowanymi w urządzeniach i maszynach górniczych. Wybór układu BMS powinien być dopasowany do konkretnego zastosowania, ze względu na maksymalne i minimalne napięcie, temperaturę pracy oraz pojemność zastosowanego ogniwa podane przez producenta. Dodatkowo stosując balansowanie aktywne należy w zależności od pojemności ogniwa dobrać wartość prądu doładowującego ogniwa. W przypadku natomiast użycia balansowania biernego należy w zależności od pojemności ogniwa i wartości prądu ładowania dobrać odpowiednią moc rezystora bocznikującego połączonego równolegle z każdym ogniwem, który bocznikuje naładowane ogniwo wytracając nadwyżkę zgromadzonej energii na ciepło.

Metody pasywne balansowania ogniw są najtańsze, ale i najmniej efektywne. Główną wadą tej metody jest mała sprawność, wynikająca z faktu, że nadwyżka energii zgromadzona w nie zrównoważonych ogniwach tracona jest w rezystorze na ciepło.

Zapewnienie długotrwałej, niezawodnej i bezpiecznej pracy ogniw litowo-żelazowo-fosforanowych wymaga przede wszystkim kontroli ich parametrów podczas pracy on-line. Dotyczy to oczywiście zarówno temperatury, jak i napięcia. Wymóg ten wynika z ograniczonych warunków chłodzenia, a także ze znacznej bezwładności cieplnej zastosowanych ogniw. W efekcie temperatura ogniw (nawet w warunkach pokojowych w okolicach 20°C i przy swobodnej wymianie ciepła z otoczeniem) może osiągnąć znaczną i niedopuszczalną wartość, nie tylko podczas głębokiego rozładowania. Może to mieć miejsce na przykład podczas krótkotrwałych, ale często i losowo powtarzanych w czasie (dozwolonych przez producenta) prądów wyładowań impulsowych.

Przeprowadzone badania wykazały, że poszczególne ogniwa tego samego typu nagrzewają się różnie i wykazują inny przebieg obniżania się napięcia

w czasie obciążenia i balansowania, nawet przy obciążeniu tą samą wartością prądu. Należy podkreślić, że zmiana parametrów poszczególnych ogniw ma miejsce również podczas pracy. Z tego powodu potrzebne jest ich zbalansowanie. Dlatego badane ogniwa litowo-żelazowo-fosforanowe (LiFePO_4) mogą być wykorzystywane do zasilania wybranych akumulatorowych podwieszanych pojazdów górniczych, ale pod warunkiem zastosowania odpowiedniego aktywnego systemu BMS.

Na rynku dostępnych jest wiele różnych rodzajów systemów BMS. Szczególnie popularne są zwłaszcza rozwiązania pasywne przeznaczone głównie dla pojazdów elektrycznych. Problemem jest jednak ich zastosowanie w warunkach górniczych. Wynika to z niepożądanego efektu rozpraszania ciepła na rezystorach wyrównawczych. Dlatego wartości tych prądów wyrównawczych muszą być ograniczone. Skutkuje to niekorzystnym wydłużeniem czasów balansowania ogniw, co znacznie obniża wydajność balansującego urządzenia. Z tego względu najkorzystniejszym i najbezpieczniejszym sposobem zasilania urządzeń górniczych jest wykorzystanie odpowiednio dobranych i dostosowanych do konkretnego zastosowania aktywnych systemów BMS.

Uzyskane wyniki badań (przeprowadzonych dla dwóch aktywnych systemów BMS przeznaczonych do zasilania podwieszanego pojazdu górniczego) wskazują, że metoda bateria-do-ogniwa jest najbardziej użyteczna. Czas trwania na przykład tzw. „zaniku” napięcia (czyli odpowiednio czas życia) wzrósł o ponad 70% w porównaniu do pracy bez BMS, dla 25% obciążonych ogniw. Wraz ze wzrostem liczby ładowanych (rozładowanych) ogniw (pod warunkiem, że nie przekracza 50%) efekt ten staje się bardziej widoczny. Należy zauważyć, że choć wpływ temperatury otoczenia znacznie skraca czas rozładowania, to nie powoduje nadmiernego wzrostu temperatury ogniw.

Przeprowadzone badania wykazały również, że niezależnie od stosowania aktywnego balansowania baterii litowej w czasie pracy ważny jest również proces ładowania akumulatora litowo-żelazowo-fosforanowego wówczas, gdy obciążenie jest odłączone. Wówczas najlepiej sprawdza się system BMS z balansowaniem pasywnym chroniąc przed przeładowaniem ogniw. Biorąc pod uwagę funkcjonowanie zarówno systemu BMS z balansowaniem aktywnym, jak i pasywnym oraz oczekiwania kopalń węgla kamiennego w zakresie wdrażania rozwiązań technicznych, pozwalających na spełnienie wymagań jakościowych, wydajnościowych i ekonomicznych wydaje się być ważnym opracowanie i zbudowanie kompleksowego systemu BMS, łączącego w sobie zalety funkcjonalne obu sposobów balansowania tj. aktywny i pasywny. Posiadanie i użycie takiego rozwiązania BMS w zdecydowany sposób poprawiłoby efektywność oraz bezpieczeństwo pracy urządzeń elektrycznych zasilanych akumulatorami litowo-żelazowo-fosforanowymi. Byłaby bowiem równocześnie zapewniona ochrona akumulatora w każdym momencie jego użytkowania tj. podczas pracy, postoju a także ładowania.

Wykaz najczęściej stosowanych oznaczeń i skrótów

T_o	– temperatura otoczenia
T_{dop}	– temperatura dopuszczalna przez producenta
T_{max}	– temperatura maksymalna
T_{min}	– temperatura minimalna
T	– temperatura zmierzona
U_n	– napięcie znamionowe
U_{dop}	– napięcie dopuszczalne przez producenta
U_{max}	– napięcie maksymalne
U_{min}	– napięcie minimalne
U_{bat}	– napięcie na baterii
U_{minbat}	– napięcie minimalne na baterii
U	– napięcie zmierzone
I_{obc}	– prąd obciążenia
I	– prąd zmierzony
I_{spr}	– standardowy prąd rozładowania 10 A (1C)
I_o	– prąd odniesienia 50 A
t	– czas

Literatura

- [1] Krasucki F.: Zagrożenia elektryczne w górnictwie. Wydawnictwo „Śląsk”. 1984.
- [2] Antoniak J.: Urządzenia i systemy transportu podziemnego w kopalniach. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1976 r.
- [3] Antoniak J.: Urządzenia i systemy transportu podziemnego w kopalniach – wydanie 2. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1990 r.
- [4] Carkhuff Bliss G., Plamen A., Demirev, and Rengaswamy Srinivasan. Impedance-based battery management system for safety monitoring of lithium-ion batteries. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2018, Vol. 65.8, pp. 6497-6504.
- [5] Cao J., Schofield N., Emadi A.: Battery Balancing Methods: A Comprehensive Review. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC, September 3-5, 2008, Harbin, China.
- [6] Lisbona D., Snee T.: A review of hazards associated with primary lithium and lithium-ion batteries. Process safety and environmental protection 2011, Vol. 89(6), pp. 434-442.
- [7] Sihua Wen: Cell Balancing Buys Extra Run Time and Battery Life, Texas Instruments, Inc., 2009.
- [8] Ziegler A., Oeser D., Arndt B., and Ackva A.: Comparison of Active and Passive Balancing by a Long-Term Test Including a Post-Mortem Analysis of all Single Battery Cells. in 2018 International IEEE Conference and Workshop in Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE) Budapest, 2018, pp. 000015–000020.
- [9] Kurpiel W., Polnik B., Miedziński B.: Właściwości eksploatacyjne ogniw litowych. elektro.info 2018, Vol. 10, pp. 44-48.
- [10] Kurpiel W., Polnik B., Miedziński B. System nadzorujący pracę baterii akumulatorów (BMS) w celu zwiększenia bezpieczeństwa ich funkcjonowania i żywotności stosowanych ogniw. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 2014, Vol. 5, pp. 47-49.
- [11] Czerwiński A.: Akumulatory, baterie, ogniwa. Wydawnictwo WKŁ. Warszawa 2018.
- [12] Zaghib K., Mauger A., Julien C. M.: Rechargeable lithium batteries for energy storage in smart grids. W: A. Franco, Rechargeable Lithium Batteries, Elsevier, (2015).
- [13] Sony Global – History. Available online: <https://www.sony.com/> and

<https://www.sony.com/en/SonyInfo/CorporateInfo/History/> (accessed on 15 April 2022).

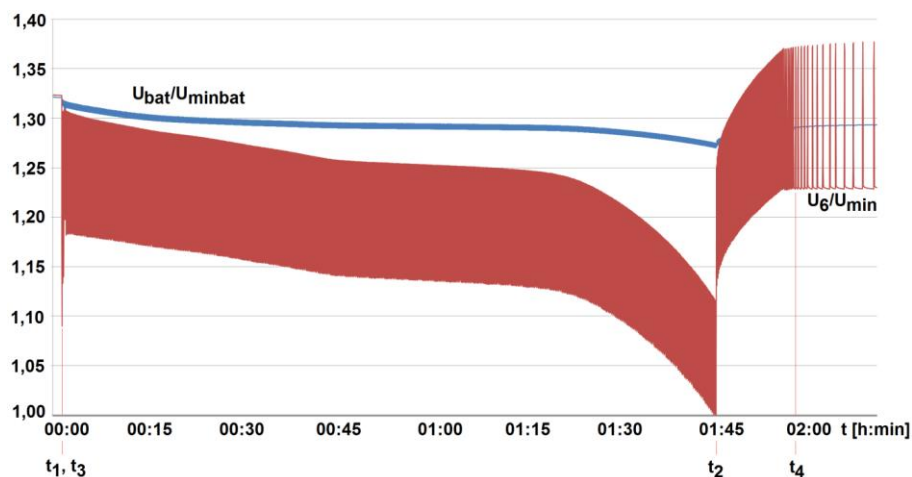
- [14] Omar N.; Monem M.A.; Firouz Y.; Salminen J.; Smekens J.; Hegazy O.; Gaulous H.; Mulder G.; Van den Bossche P.; Coosemans T.; et al.: Lithium iron phosphate based battery-Assesment of the aging parameters and development of cycle life model. *Appl. Energy* 2014, 113, 1575–1585.
- [15] Czerwiński A.: *Współczesne źródła energii*, UW-ICHP (2001).
- [16] Montanino M., Passerini S., Appetecchi G.B.: *Electrolytes for rechargeable lithium batteries*. W: A. A. Franco, *Rechargeable Lithium Batteries*, Elsevier (2015).
- [17] Levy S.C.: Safety and Reliability Considerations for Lithium Batteries. *J. Power Sources* 1997, 68, 75–77.
- [18] Amanor-Boadu J. M., Guiseppi-Elie A., and Sánchez-Sinencio E.: “The Impact of Pulse Charging Parameters on the Life Cycle of Lithium-Ion Polymer Batteries”. In: *Energies* 11.8 (2018). ISSN: 1996-1073.DOI:10.3390/en11082162. URL:<https://www.mdpi.com/1996-1073/11/8/2162>.
- [19] Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 28 lipca 2021 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie zagrożeń naturalnych w zakładach górniczych [Dz. U.z 2021 poz. 1420].
- [20] Tsenter B., Golod M.: *Energy Transfer and Equalization in Rechargeable Lithium Batteries*, Mar. 21, 2000.
- [21] Barsukov Y.: *Battery Cell Balancing: What to Balance and How*; Texas Instruments, Inc.: Dallas, TX, USA, 2005.
- [22] Wen S.: *Cell Balancing Buys Extra Run Time and Battery Life*; Texas Instruments, Inc.: Dallas, TX, USA, 2009.
- [23] Ziegler A.; Oeser D.; Arndt B.; Ackva A.: Comparison of Active and Passive Balancing by a Long-Term Test Including a Post-Mortem Analysis of all Single Battery Cells. In *Proceedings of the 2018 International IEEE Conference and Workshop in Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE)*, Budapest, Hungary, 20–21 November 2018; pp. 000015–000020.
- [24] Xiong R.; Li L.; Tian J. Towards a smarter battery management system: A critical review on battery state of health monitoring methods. *J. Power Sources* 2018, 405, 18–29.

- [25] Lipu, M.H.; Hannan, M.A.; Karim, T.F.; Hussain, A.; Saad, M.H.; Ayob, A.; Miah, M.S.; Mahlia, T.I. Intelligent algorithms and control strategies for battery management system in electric vehicles: Progress, challenges and future outlook. *J. Clean. Prod.* 2021, 292, 126044.
- [26] Peri,soara L.A.; Guran I.C.; Costache D.C.: A passive battery management system for fast balancing of four LiFePO4 cells. In *Proceedings of the 2018 IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Iasi, Romania, 25–28 October 2018; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2018.
- [27] Daowd M.; Omar N.; Van Den Bossche P.; Van Mierlo J.: Passive and Active Battery Balancing comparison based on MATLAB Simulation. In *Proceedings of the 7th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC'11*, Chicago, IL, USA, 6–9 September 2011.
- [28] Lukasiewicz M.; Kauer M.; Steinhorst S.: Synthesis of Active Cell Balancing Architectures for Battery Packs. *IEEE Trans. Comput. Aided Des. Integr. Circuits Syst.* 2016, 35, 1876–1889.
- [29] Zheng X.; Liu X.; He Y.; Zeng G.: Active vehicle battery equalization scheme in the condition of constant-voltage/current charging and discharging. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2017, 12, 47–49.
- [30] Shah S.; Murali M.; Gandhi P.: A Practical Approach of Active Cell Balancing in a Battery Management System. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Chennai, India, 18–21 December 2018; pp. 1–6.
- [31] Gallardo-Lozano J., Romero-Cadaval E., M. Milanes-Montero M., Miguel I., Guerrero-Martinez A.: Battery equalization active methods. *The International Journal on the Science and Technology of Electrochemical Energy Systems*. 2014 Volume: 246 Pages: 934-949 .
- [32] Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 21 czerwca 2024 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o efektywności energetycznej [Dz.U. z 2024, poz. 1047].
- [33] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. prawo energetyczne (z późn. zm.) [Dz. U. 1997 Nr 54 poz. 348].
- [34] Gabano J.-P.: *Lithium Batteries*, JohnWiley & Sons, Inc (2013).
- [35] Jura J., Bartoszek S.: Układ aktywnego balansowania baterii ogniwo litowych przeznaczony do górniczych maszyn mobilnych. *Maszyny Górnicze* 2019, 1, 52–65.
- [36] Kurpiel W.: Trwałość i bezpieczeństwo pracy baterii ogniwo litowych z aktywnym systemem balansowania w układach zasilania maszyn

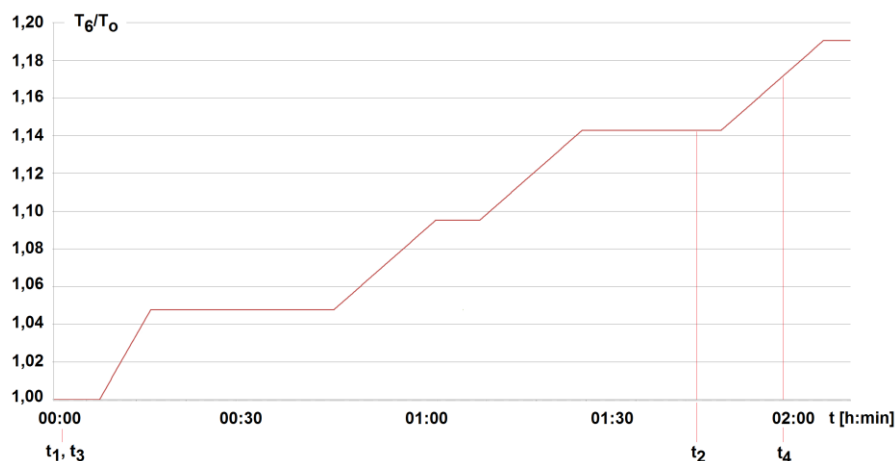
- górnictwa pracujących w atmosferze wybuchowej. In: SEMAG 2017 Automatyka i elektroenergetyka w przemyśle wydobywczym, Mysłakowice, 29-31 maja 2017 s. 6-22.
- [37] Carkhuff B.G., Demirev P.A., Srinivasan R.: Impedance-based battery management system for safety monitoring of lithium-ion batteries. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2018, 65, 6497–6504.
- [38] Frost D.F., Howey D.A.: Completely decentralized active balancing battery management system. *IEEE Trans. Power Electron.*
- [39] Xu J., Li S., Mi C., Chen Z., Cao B.: SOC Based Battery Cell Balancing with a Novel Topology and Reduced Component Count. *Energies* 2013, 6, 2726–2740.
- [40] Lipu M.H., Hannan M.A., Karim T.F., Hussain A., Saad M.H., Ayob A., Miah M.S., Mahlia T.I.: Intelligent algorithms and control strategies for battery management system in electric vehicles: Progress, challenges and future outlook. *J. Clean. Prod.* 2021, 292, 126044.
- [41] Dokumentacja baterii LiFePO₄ 3,2 V. Dostępna online: [https://www.bto.pl/produkt/31801/headway-lfp38120\(s\)-10000mah-lifepo4](https://www.bto.pl/produkt/31801/headway-lfp38120(s)-10000mah-lifepo4) (dostęp 10 sierpnia 2021 r.).
- [42] Xiong R., Li L., Tian J.: Towards a smarter battery management system: A critical review on battery state of health monitoring methods. *J. Power Sources* 2018, 405, 18–29.
- [43] Documentation of Voltage Output Temperature Sensor with Signal Conditioning. Available online: <https://www.analog.com/en/products/ad22100.html#> (accessed on 5 August 2021).
- [44] Lisbona D., Snee T.: A review of hazards associated with primary lithium and lithium-ion batteries. *Process. Saf. Environ. Prot.* 2011, 89, 434–442.
- [45] Karta katalogowa: Podwieszony Ciągnik Akumulatorowy PCA-1, PCA-1/ZT. Dostępna online: https://www.gabrypol.com/wp-content/uploads/2016/10/Gabrypol-PCA-1-PCA-1_ZT.pdf. (dostęp 4 kwietnia 2025 r.).
- [46] Taylor R. J.: *Introduction to Error Analysis, the Study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2nd ed.; University Science Books: Sausalito, CA, USA, 1997.

ZAŁĄCZNIK I

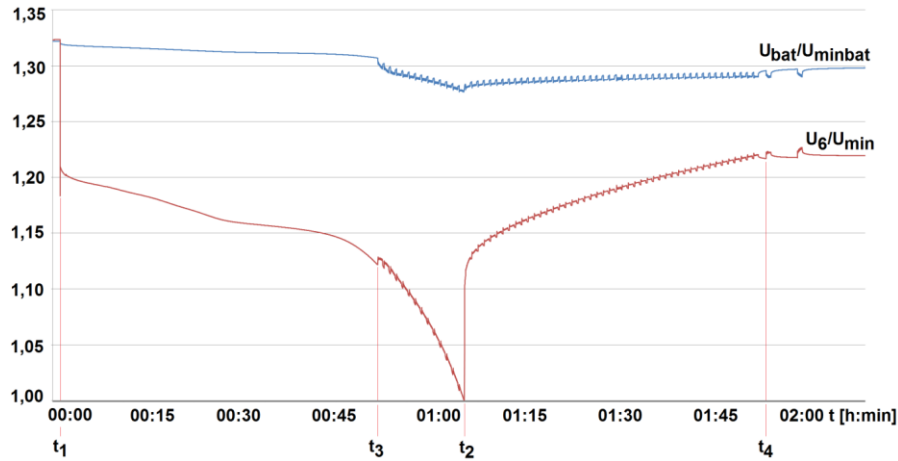
Wyniki badań stanowiskowych systemów BMS



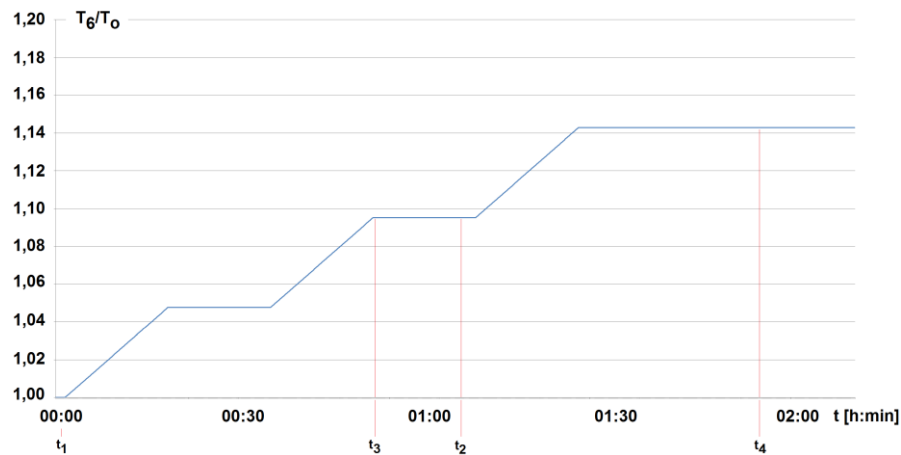
Rys. I.1. Zmienność napięcia $U_6/U_{\min}$ w czasie dla jednego ogniwa obciążonego, nieobciążonej baterii z systemem BMS-A1 z aktywnym balansowaniem metodą baterii do ogniwa (temperatura pokojowa $T_0 = 20^\circ\text{C}$, chłodzenie swobodne), t_1 , t_2 - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, $U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3 , t_4 - włączanie i wyłączanie aktywnego balansowania



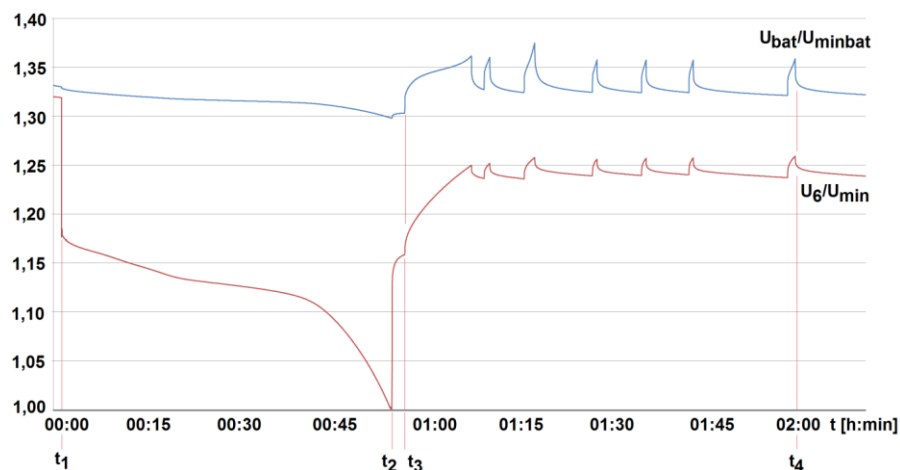
Rys. I.2 Wykres zmian temperatury na jednym obciążonym ogniwie dla systemu BMS-A1, temperatura pokojowa $T_0 = 20^\circ\text{C}$, t_1 , t_2 - moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3 , t_4 - włączanie i wyłączanie aktywnego balansowania



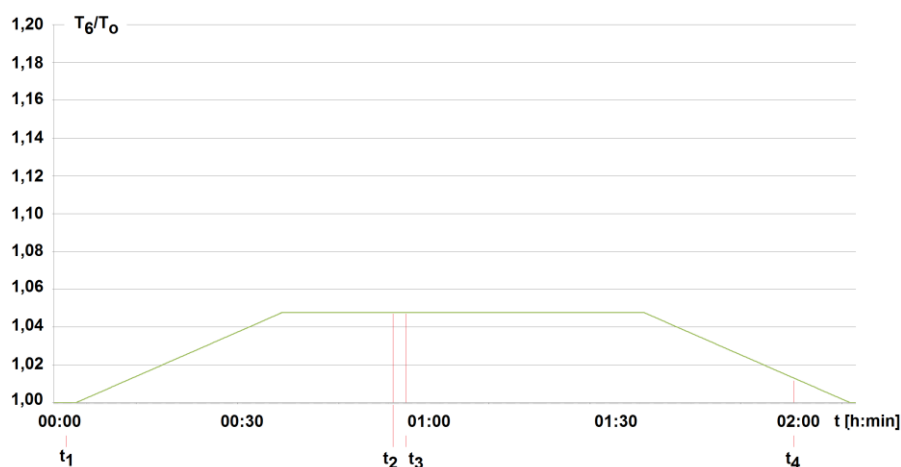
Rys. I.3. Zmienność napięcia $U_6/U_{\min}$ w czasie dla jednego ogniwa obciążonego, nieobciążonej baterii z systemem BMS-A2 z aktywnym balansowaniem metodą ogniwo do baterii (temperatura pokojowa $T_0 = 20^\circ\text{C}$, chłodzenie swobodne), t_1 , t_2 - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, $U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3 , t_4 - włączanie i wyłączanie aktywnego balansowania



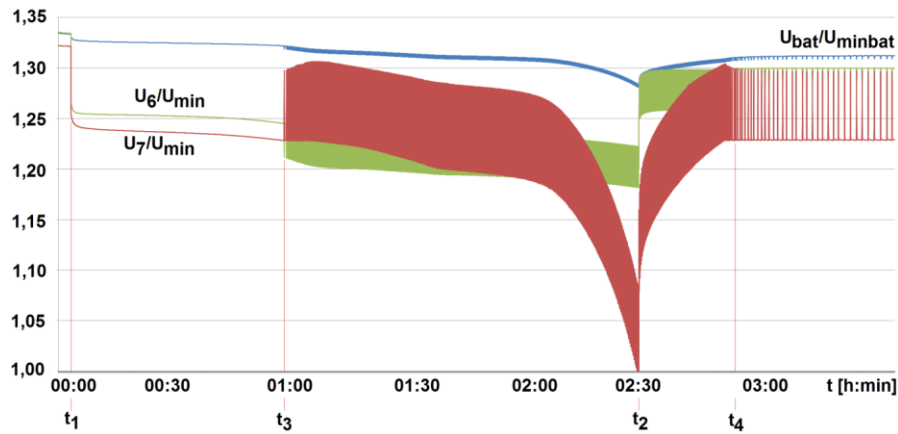
Rys. I.4 Wykres zmian temperatury na jednym obciążonym ogniwie dla systemu BMS-A2, temperatura pokojowa $T_0 = 20^\circ\text{C}$, t_1 , t_2 - moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3 , t_4 - włączanie i wyłączanie aktywnego balansowania



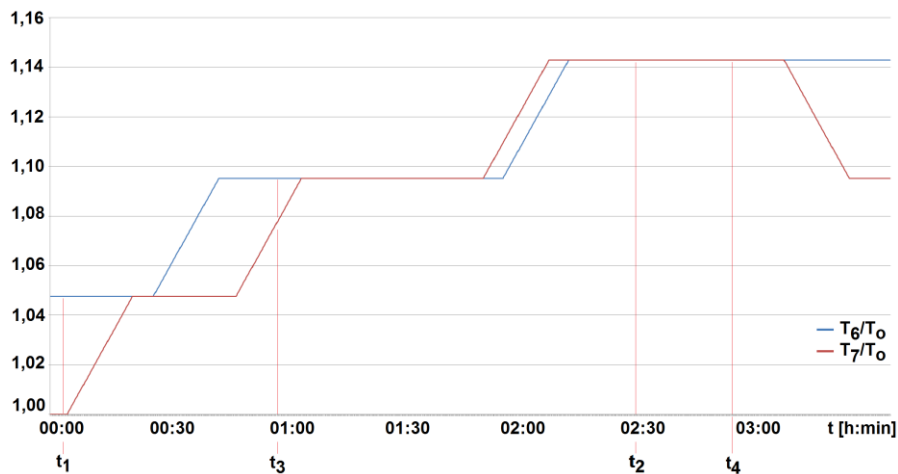
Rys. I.5. Zmienność napięcia $U_6/U_{\min}$ w czasie dla jednego ogniw obciążonego, nieobciążonej baterii z pasywnym systemem BMS-P (temperatura pokojowa $T_o = 20^\circ\text{C}$, chłodzenie swobodne), t_1 , t_2 - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, $U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3 , t_4 - włączanie i wyłączanie pasywnego balansowania



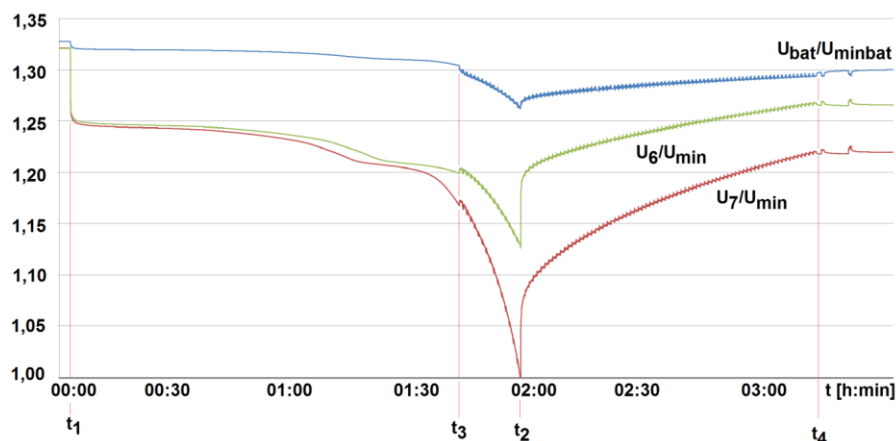
Rys. I.6. Wykres zmian temperatury na jednym obciążonym ogniwie dla systemu BMS-P, temperatura pokojowa $T_o = 20^\circ\text{C}$, t_1 , t_2 - moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3 , t_4 - włączanie i wyłączanie aktywnego balansowania



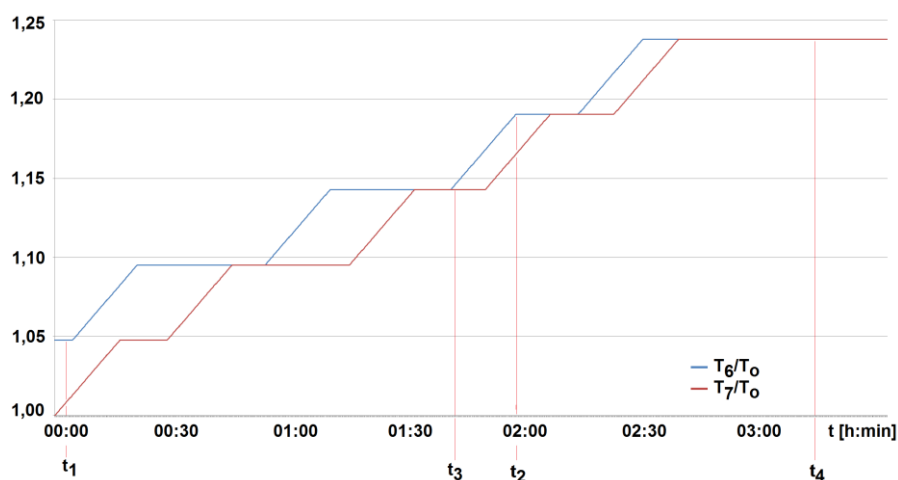
Rys. I.7. Zmienność napięcia $U_6/U_{\min}$ i $U_7/U_{\min}$ w czasie dla dwóch ogniw obciążonych szeregowo (ogniwa nr 6 i nr 7 - patrz rys. 8.22) nieobciążonej baterii z systemem BMS-A1 metodą bateria do ogniwa (temperatura pokojowa $T_o = 20^\circ\text{C}$, chłodzenie swobodne), t_1 , t_2 - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, $U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3 , t_4 - włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



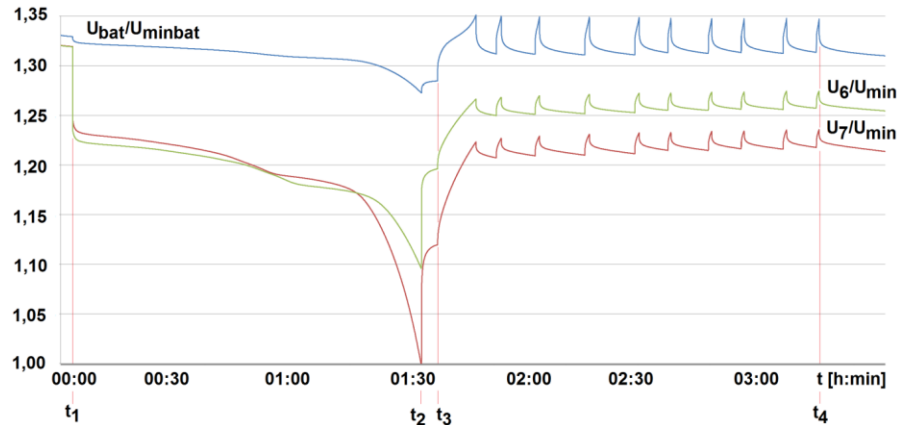
Rys. I.8. Wykres zmian temperatury dla dwóch obciążonych ogniw dla systemu BMS-A1, temperatura pokojowa $T_o = 20^\circ\text{C}$, t_1 , t_2 - moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3 , t_4 - włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



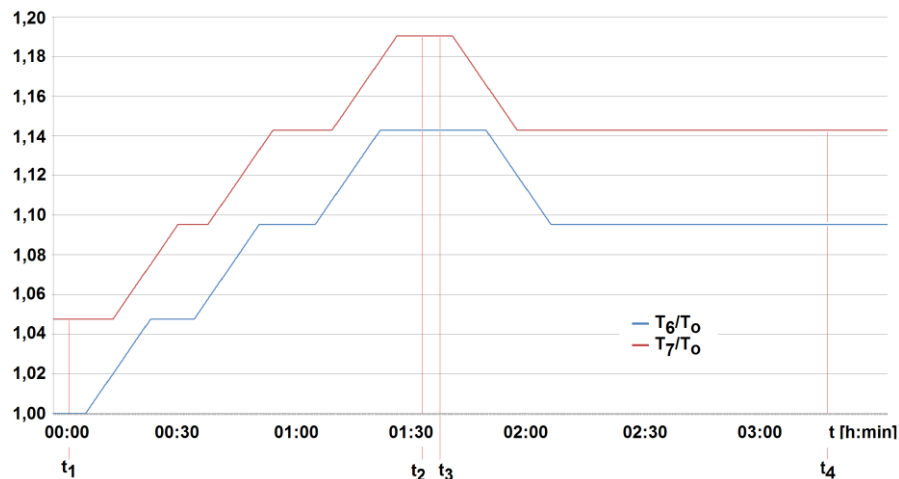
Rys. I.9. Zmienność napięcia $U_6 / U_{\min}$ i $U_7 / U_{\min}$ w czasie dla dwóch ogniw ładowanych szeregowo (ogniwa nr 6 i nr 7 - patrz rys. 8.22) nieobciążonej baterii z systemem BMS-A2 z aktywnym balansowaniem metodą ogniwo do baterii (temperatura pokojowa $T_o = 20^\circ\text{C}$, chłodzenie swobodne), t_1, t_2 - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, $U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3, t_4 - włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



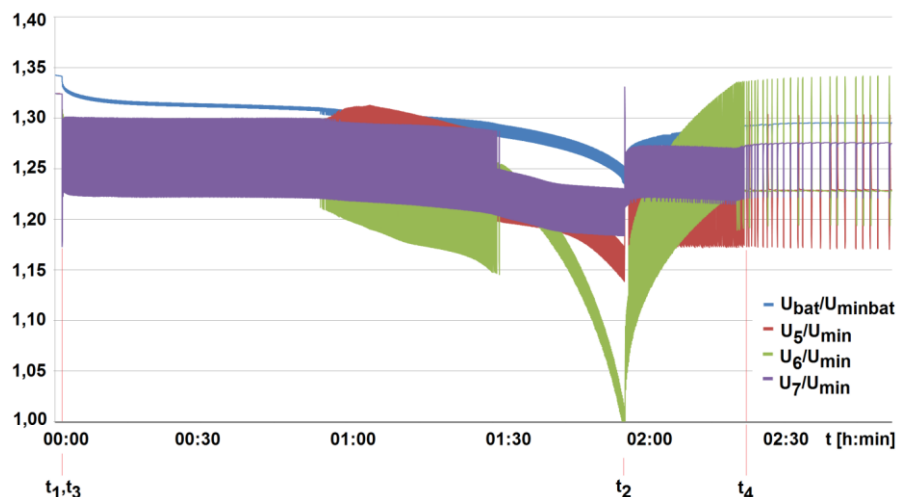
Rys. I.10. Wykres zmian temperatury dla dwóch obciążonych ogniw dla systemu BMS-A2, temperatura pokojowa $T_o = 20^\circ\text{C}$, t_1, t_2 - moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3, t_4 - włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



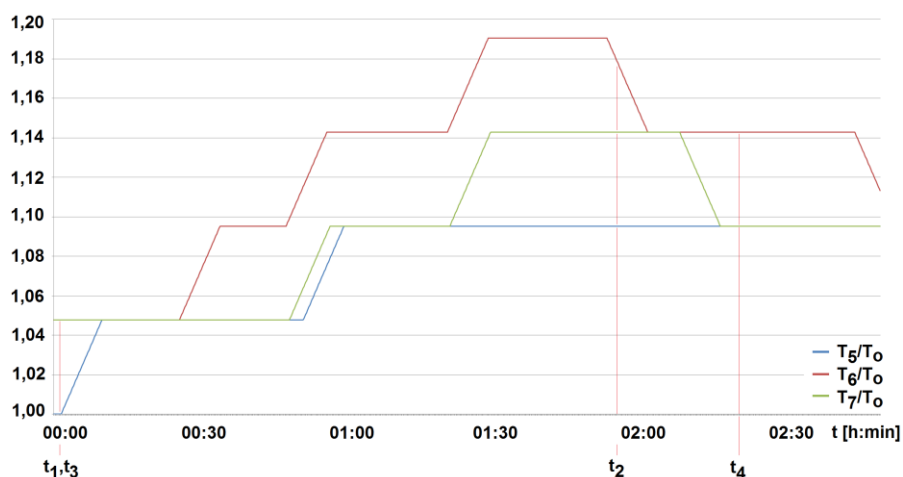
Rys. I.11. Zmienność napięcia $U_6/U_{\min}$ i $U_7/U_{\min}$ w czasie dla dwóch ogniw obciążonych szeregowo (ogniwa nr 6 i nr 7 - patrz rys. 8.22) nieobciążonej baterii z pasywnym systemem BMS-P (temperatura pokojowa $T_0 = 20^\circ\text{C}$, chłodzenie swobodne), t_1 , t_2 – moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia 2,5 A, $U_{\min}$ – minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ – minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} – napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3 , t_4 - włączanie i wyłączenie pasywnego balansowania



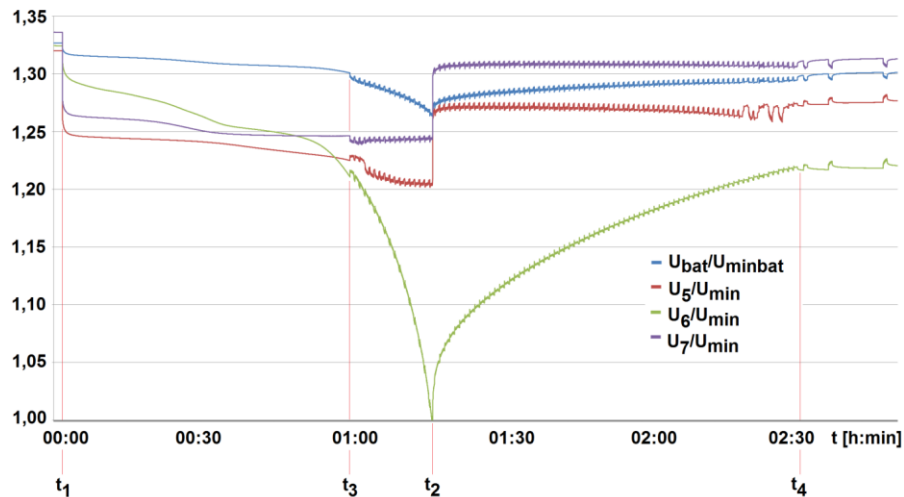
Rys. I.12. Wykres zmian temperatury dla dwóch obciążonych ogniw dla systemu BMS-P, temperatura pokojowa $T_0 = 20^\circ\text{C}$, t_1 , t_2 – moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3 , t_4 - włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



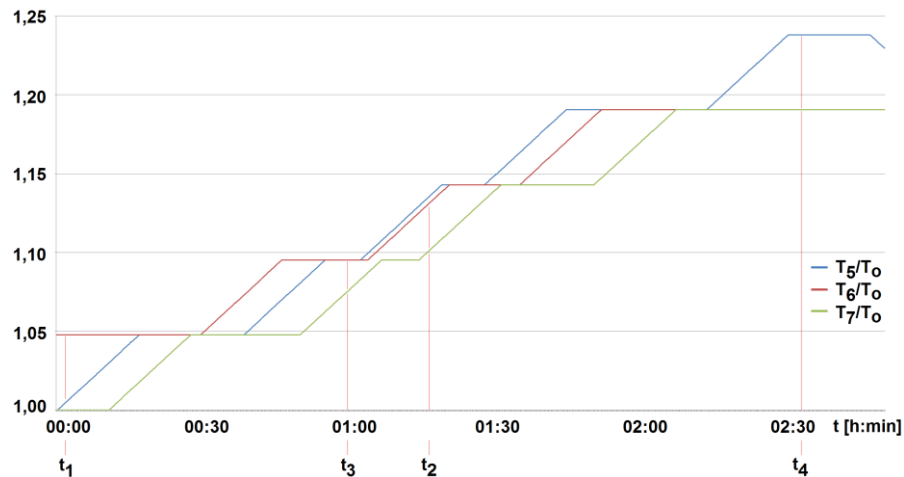
Rys. I.13. Zmienność napięcia $U_5/U_{\min}$, $U_6/U_{\min}$ i $U_7/U_{\min}$ w czasie dla trzech ogniw obciążonych szeregowo (ogniwa nr 5, nr 6 i nr 7 - patrz rys. 8.22) nieobciążonej baterii z systemem BMS-A1 z aktywnym balansowaniem metodą bateria do ogniwa (temperatura pokojowa $T_0 = 20^\circ\text{C}$, chłodzenie swobodne), t_1 , t_2 – moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia 2,5 A, $U_{\min}$ – minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ – minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} – napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3 , t_4 – włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



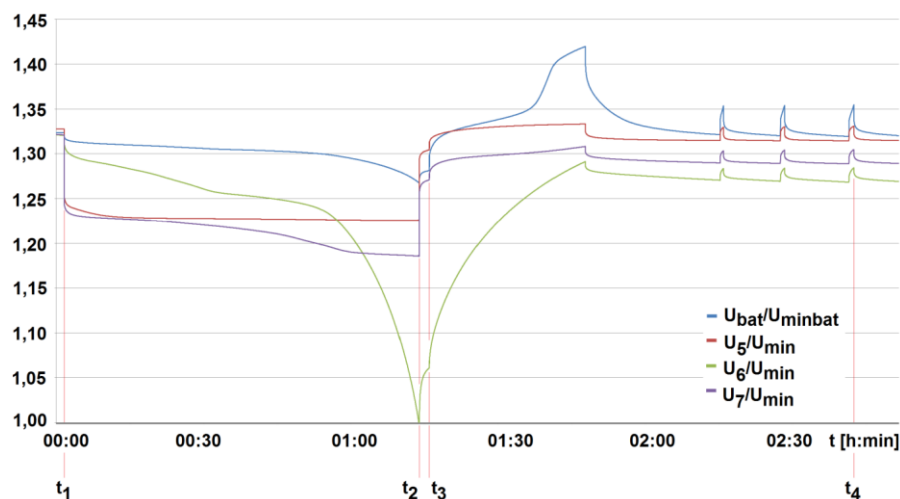
Rys. I.14. Wykres zmian temperatury dla trzech obciążonych ogniw dla systemu BMS-A1, temperatura pokojowa $T_0 = 20^\circ\text{C}$, t_1 , t_2 – moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3 , t_4 – włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



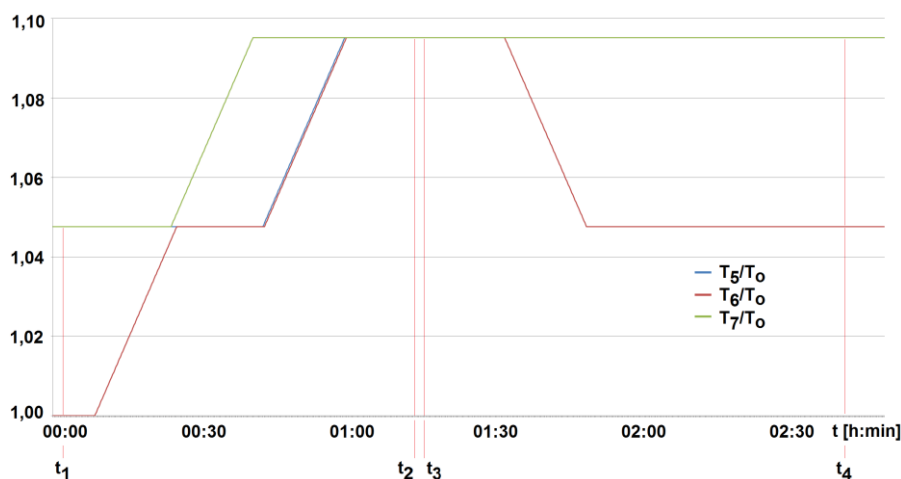
Rys. I.15. Zmienność napięcia U_5/U_{min} , U_6/U_{min} i U_7/U_{min} w czasie dla trzech ogniw obciążonych szeregowo (ogniwa nr 5, nr 6 i nr 7 - patrz rys. 8.22) nieobciążonej baterii z systemem BMS-A2 z aktywnym balansowaniem metodą ogniwo do baterii (temperatura pokojowa $T_0 = 20^\circ\text{C}$, chłodzenie swobodne), t_1 , t_2 – moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia 2,5 A, U_{min} – minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, U_{minbat} – minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} – napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3 , t_4 - włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



Rys. I.16. Wykres zmian temperatury dla trzech obciążonych ogniw dla systemu BMS-A2, temperatura pokojowa $T_0 = 20^\circ\text{C}$, t_1 , t_2 – moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3 , t_4 - włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



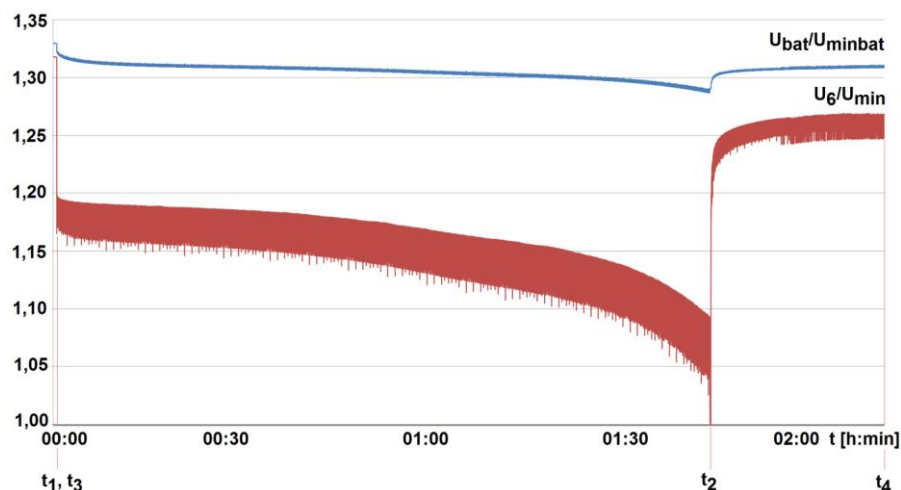
Rys. I.17. Zmienność napięcia $U_5/U_{\min}$, $U_6/U_{\min}$ i $U_7/U_{\min}$ w czasie dla trzech ogniw obciążonych szeregowo (ogniwa nr 5, nr 6 i nr 7 - patrz rys. 8.22) nieobciążonej baterii z pasywnym systemem BMS-P (temperatura pokojowa $T_0 = 20^\circ\text{C}$, chłodzenie swobodne), t_1 , t_2 – moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia 2,5 A, $U_{\min}$ – minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ – minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} – napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3 , t_4 – włączanie i wyłączenie pasywnego balansowania



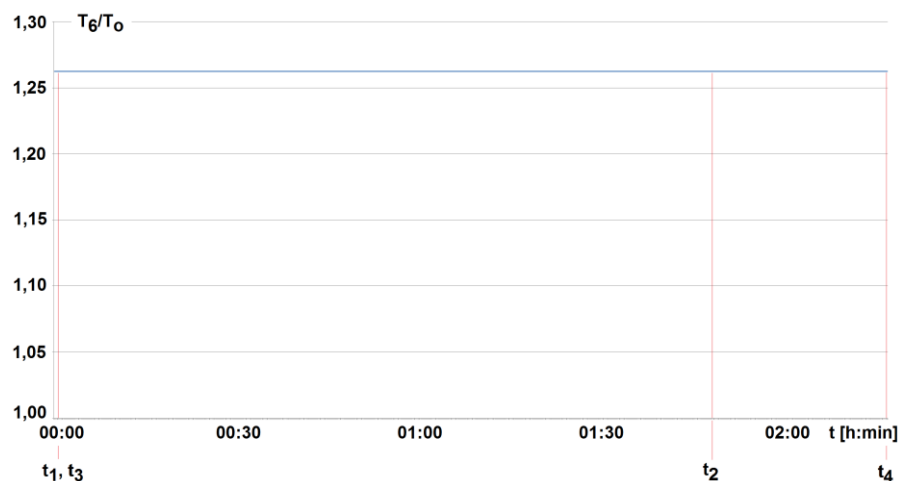
Rys. I.18. Wykres zmian temperatury dla trzech obciążonych ogniw dla systemu BMS-P, temperatura pokojowa $T_0 = 20^\circ\text{C}$, t_1 , t_2 – moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3 , t_4 – włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania

ZAŁĄCZNIK II

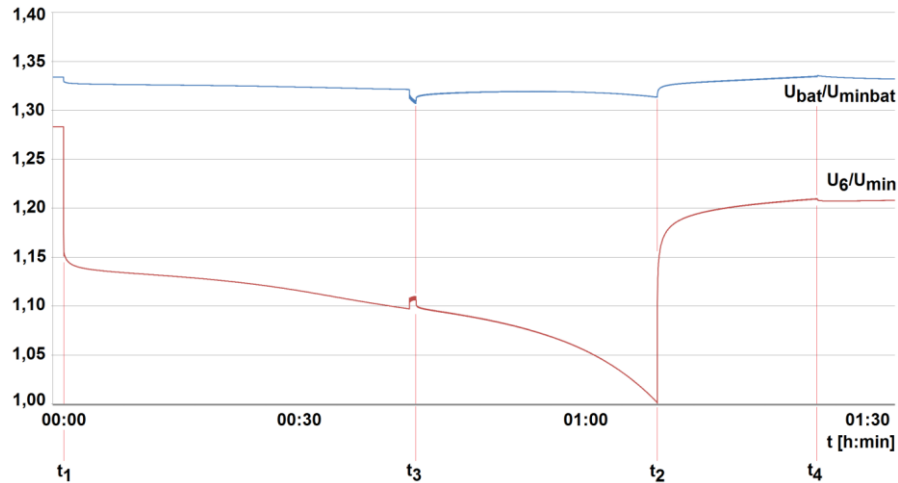
Wyniki badań systemów BMS z aktywnym balansowaniem w komorze klimatycznej



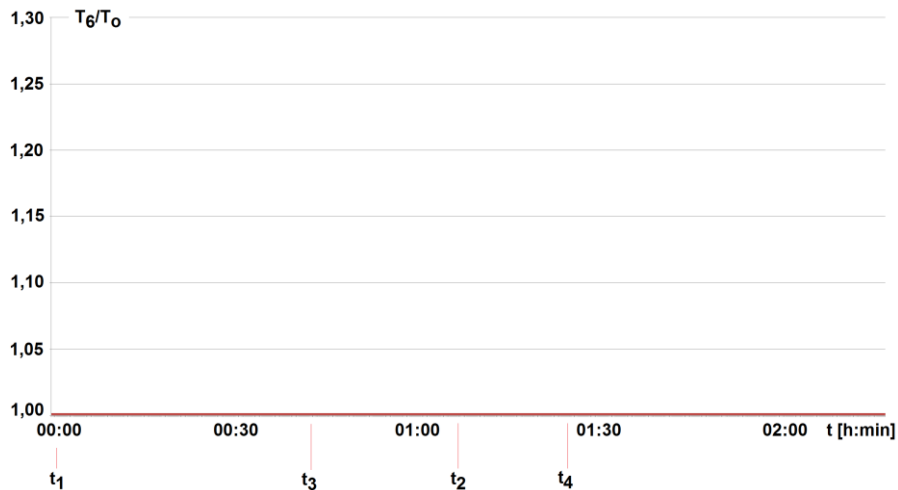
Rys. II.1. Zmienność napięcia $U_6/U_{\min}$ w czasie dla jednego ogniw obciążonego, nieobciążonej baterii z systemem BMS-A1 z aktywnym balansowaniem metodą bateria do ogniw (temperatura ustawiona w komorze klimatycznej $T_0 = +5^\circ\text{C}$), t_1 , t_2 - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, $U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniw równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3 , t_4 - włączanie i wyłączanie aktywnego balansowania



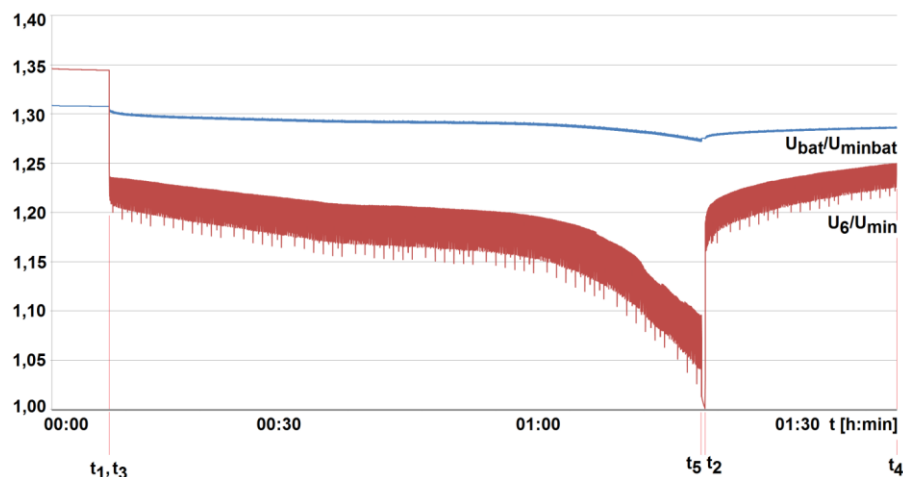
Rys. II.2. Wykres przebiegu wartości temperatury na obciążonym ogniwie dla badanego systemu BMS-A1 z aktywnym balansowaniem metodą bateria do ogniw w temperaturze $T_0 = +5^\circ\text{C}$ i wilgotności 75%, t_1 , t_2 - moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3 , t_4 - włączanie i wyłączanie aktywnego balansowania



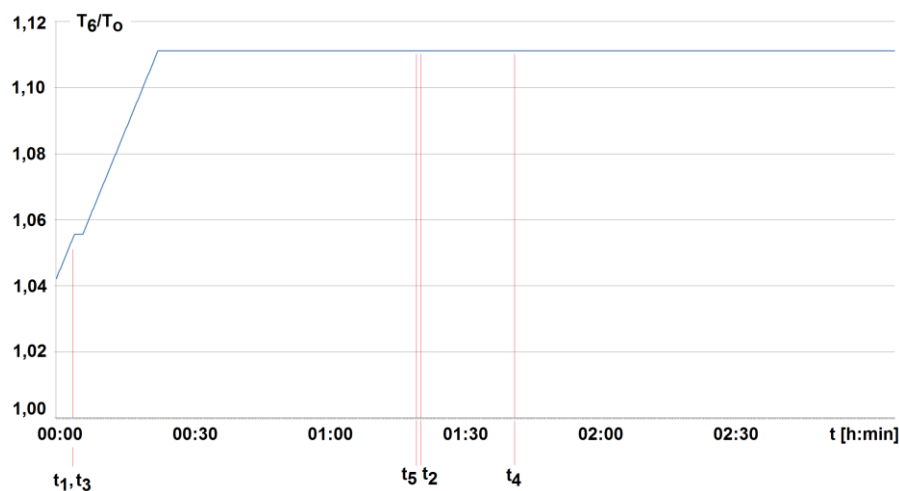
Rys. II.3. Zmienność napięcia $U_6/U_{\min}$ w czasie dla jednego ogniwa obciążonego, nieobciążonej baterii z systemem BMS-A2 z aktywnym balansowaniem metodą ogniwo do baterii (temperatura ustawiona w komorze klimatycznej $T_o = +5^\circ\text{C}$), t_1 , t_2 - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, $U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3 , t_4 - włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



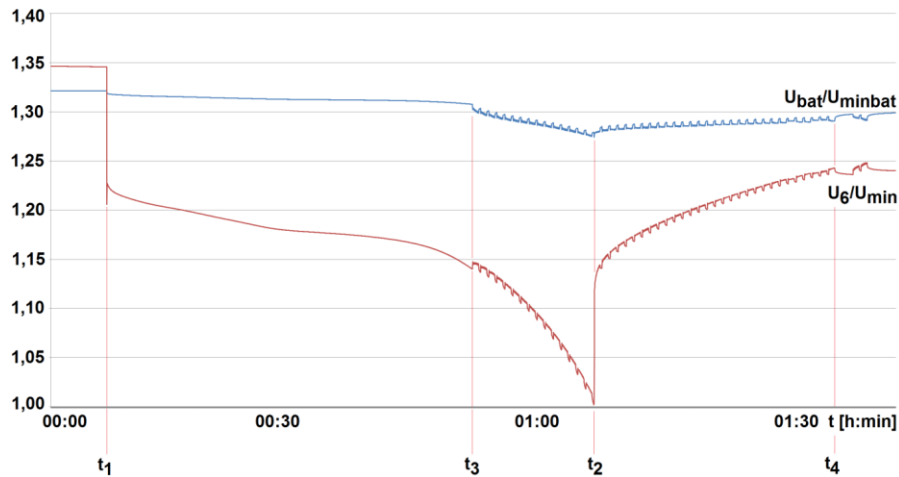
Rys. II.4. Wykres przebiegu wartości temperatury na obciążonym ogniwie dla badanego systemu BMS-A2 z aktywnym balansowaniem metodą ogniwo do baterii w temperaturze $T_o = +5^\circ\text{C}$ i wilgotności 75%, t_1 , t_2 - moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3 , t_4 - włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



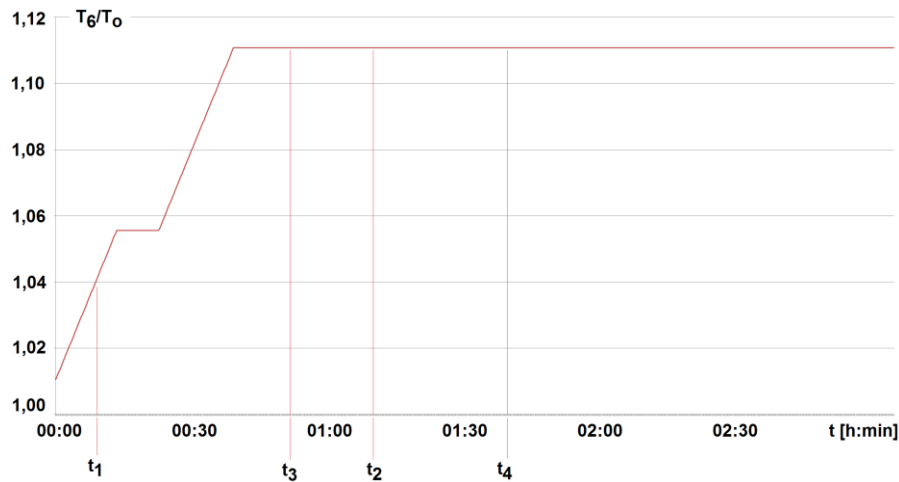
Rys. II.5. Zmienność napięcia $U_6/U_{\min}$ w czasie dla jednego ogniwa obciążonego, nieobciążonej baterii z systemem BMS-A1 z aktywnym balansowaniem metodą bateria do ogniwa (temperatura ustawiona w komorze klimatycznej $T_o = +20^\circ\text{C}$), t_1 , t_2 - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, $U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3 , t_4 - włączanie i wyłączanie aktywnego balansowania, t_5 - wyłączenie aktywnego balansowania z powodu przekroczenia minimalnego napięcia działania systemu balansującego



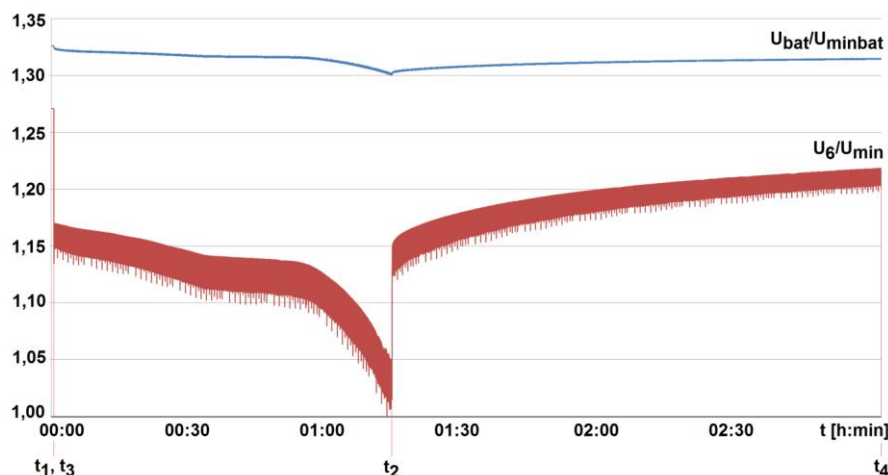
Rys. II.6. Wykres przebiegu wartości temperatury na obciążonym ogniwie dla badanego systemu BMS-A1 z aktywnym balansowaniem metodą bateria do ogniwa w temperaturze $T_o = +20^\circ\text{C}$ i wilgotności 75%, t_1 , t_2 - moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3 , t_4 - włączanie i wyłączanie aktywnego balansowania, t_5 - wyłączenie aktywnego balansowania z powodu przekroczenia minimalnego napięcia działania systemu balansującego



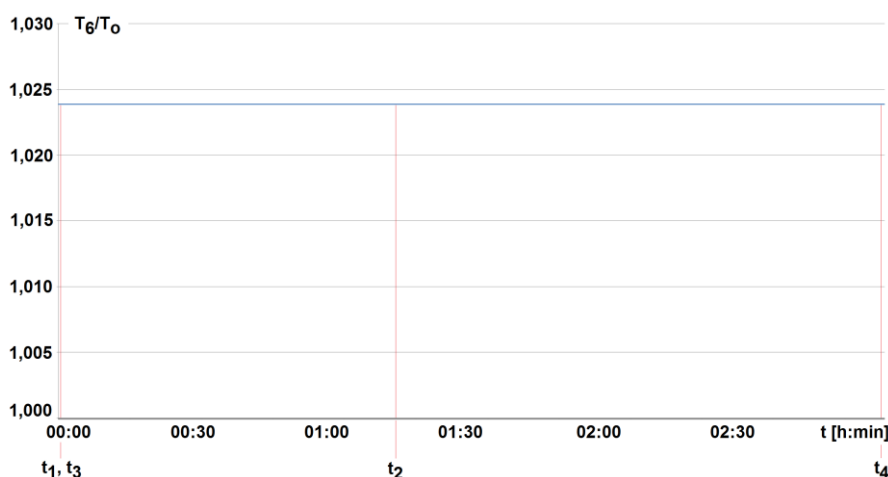
Rys. II.7. Zmienność napięcia $U_6/U_{\min}$ w czasie dla jednego ogniwa obciążonego, nieobciążonej baterii z systemem BMS-A2 z aktywnym balansowaniem metodą ogniwo do baterii (temperatura ustawiona w komorze klimatycznej $T_o = +20^\circ\text{C}$), t_1, t_2 - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, $U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3, t_4 - włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



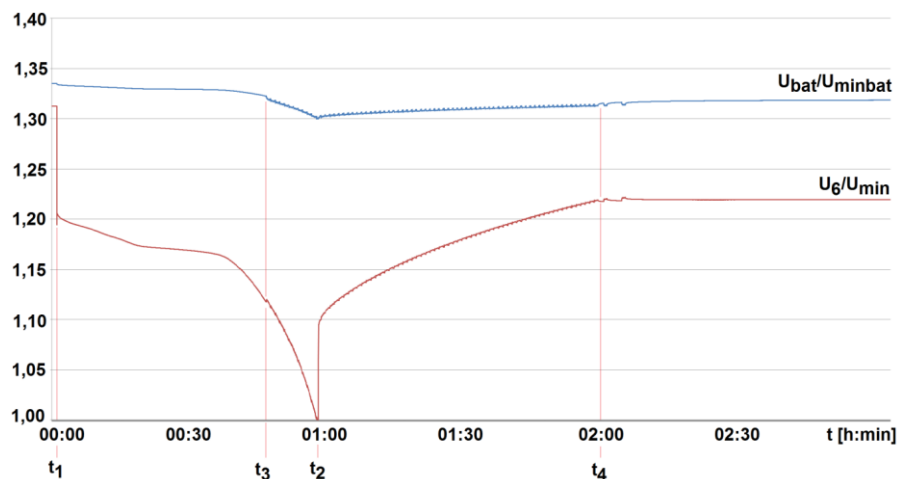
Rys. II.8. Wykres przebiegu wartości temperatury na obciążonym ogniwie dla badanego systemu BMS-A2 z aktywnym balansowaniem metodą ogniwo do baterii w temperaturze $T_o = +20^\circ\text{C}$ i wilgotności 75%, t_1, t_2 - moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3, t_4 - włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



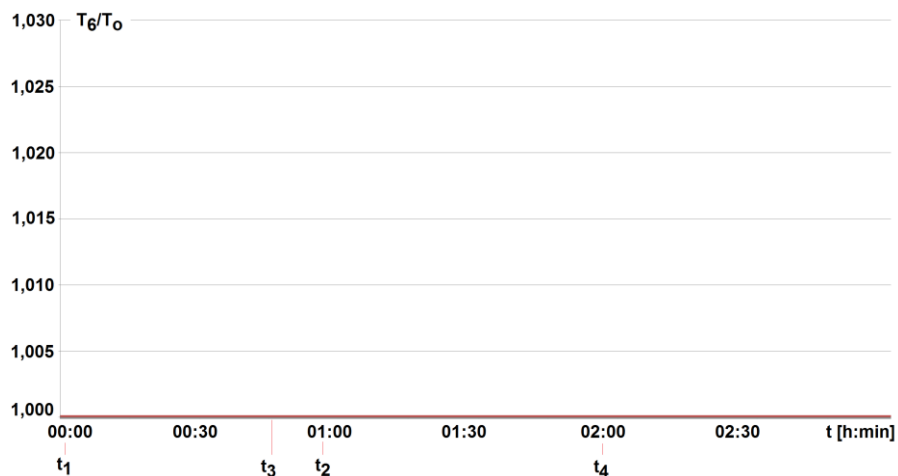
Rys. II.9. Zmienność napięcia U_6/U_{min} w czasie dla jednego ogniwa obciążonego, nieobciążonej baterii z systemem BMS-A1 z aktywnym balansowaniem metodą bateria do ogniwa (temperatura ustawiona w komorze klimatycznej $T_o = +45^\circ\text{C}$), t_1, t_2 - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, U_{min} - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, U_{minbat} - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3, t_4 - włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



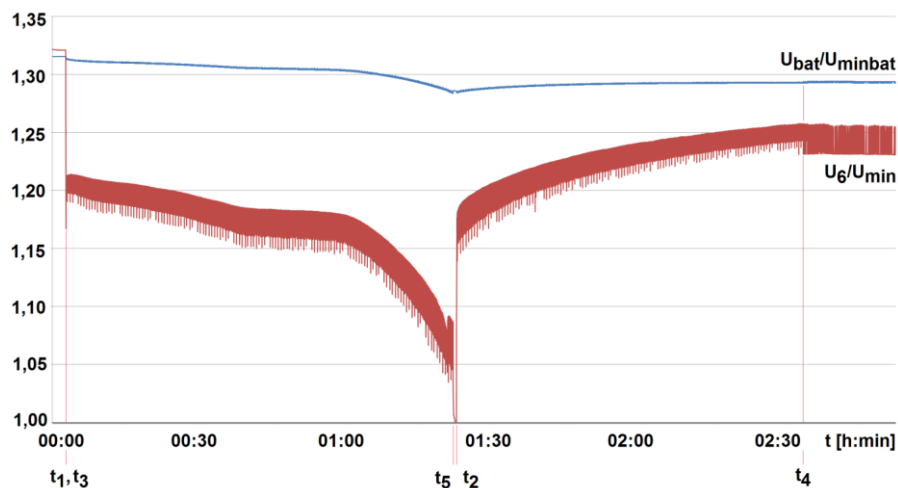
Rys. II.10. Wykres przebiegu wartości temperatury na obciążonym ogniwie dla badanego systemu BMS-A1 z aktywnym balansowaniem metodą bateria do ogniwa w temperaturze $T_o = +45^\circ\text{C}$ i wilgotności 75%, t_1, t_2 - moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3, t_4 - włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



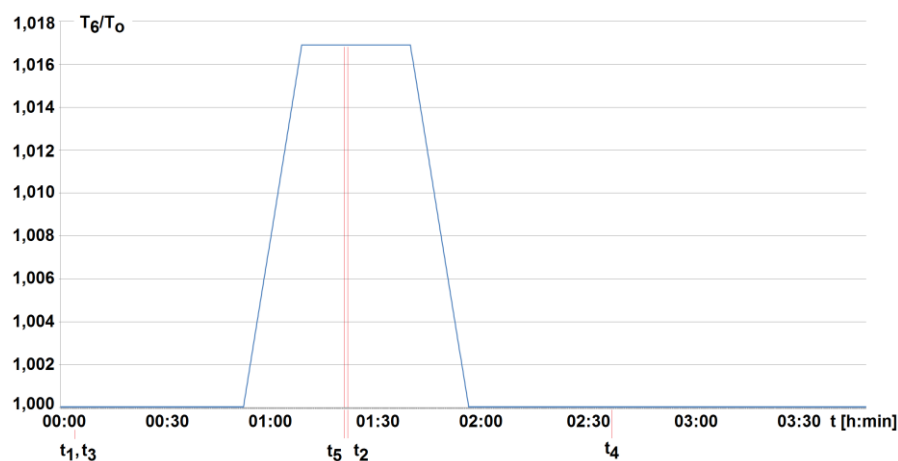
Rys. II.11. Zmienność napięcia $U_6/U_{\min}$ w czasie dla jednego ogniwa obciążonego, nieobciążonej baterii z systemem BMS-A2 z aktywnym balansowaniem metodą ogniwo do baterii (temperatura ustawiona w komorze klimatycznej $T_0 = +45^\circ\text{C}$), t_1 , t_2 - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, $U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3 , t_4 - włączanie i wyłączanie aktywnego balansowania



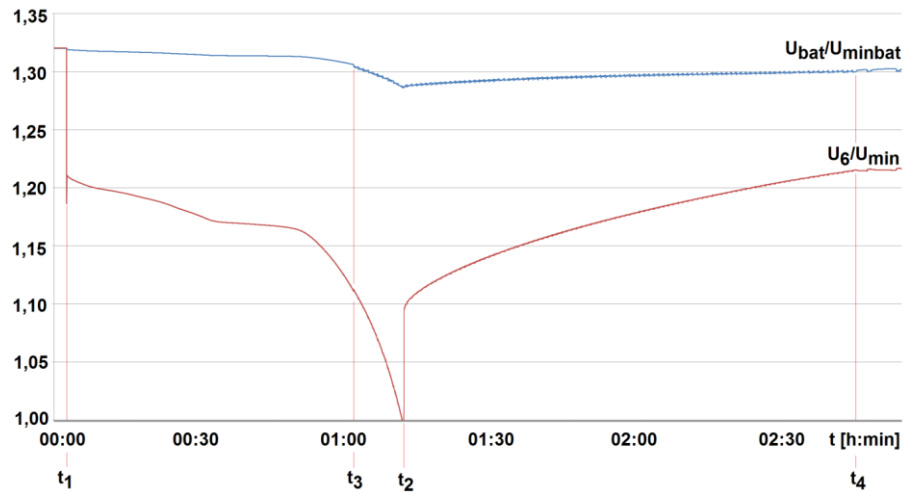
Rys. II.12. Wykres przebiegu wartości temperatury na obciążonym ogniwie dla badanego systemu BMS-A2 z aktywnym balansowaniem metodą ogniwo do baterii w temperaturze $T_0 = +45^\circ\text{C}$ i wilgotności 75%, t_1 , t_2 - moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3 , t_4 - włączanie i wyłączanie aktywnego balansowania



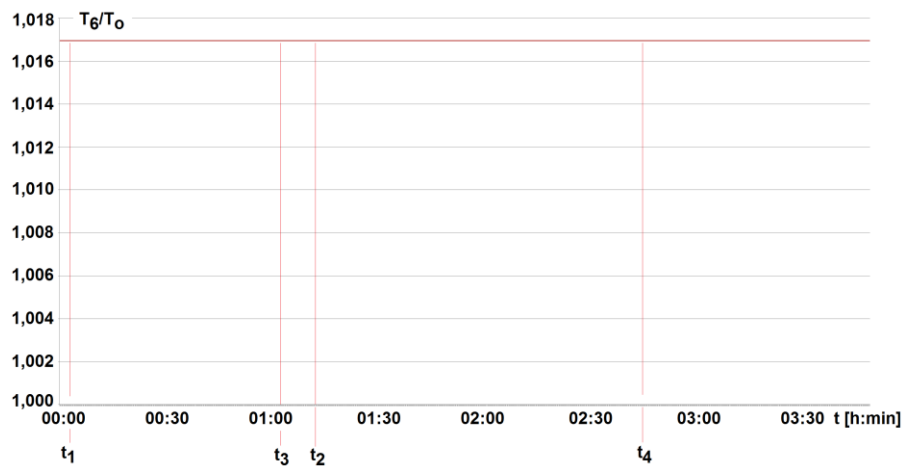
Rys. II.13. Zmienność napięcia $U_6/U_{\min}$ w czasie dla jednego ogniwa obciążonego, nieobciążonej baterii z systemem BMS-A1 z aktywnym balansowaniem metodą baterii do ogniwa (temperatura ustawiona w komorze klimatycznej $T_o = +60^\circ\text{C}$), t_1 , t_2 - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, $U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3 , t_4 - włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



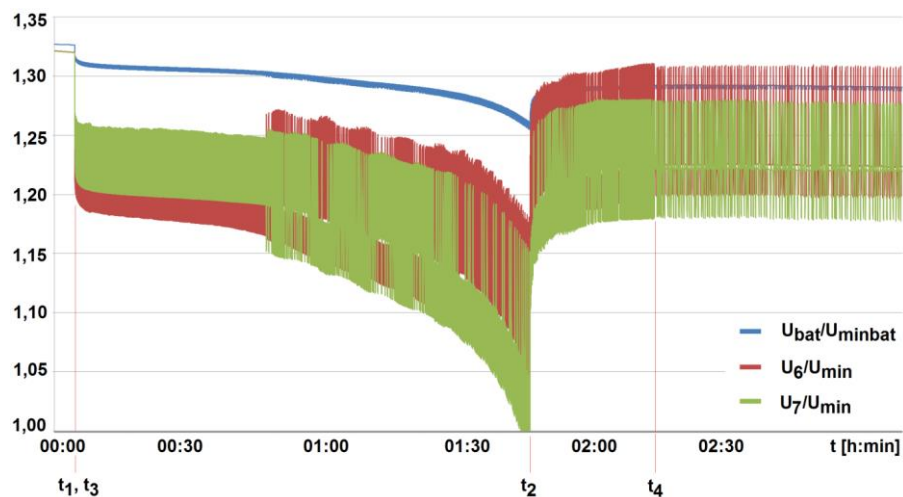
Rys. II.14. Wykres przebiegu wartości temperatury na obciążonym ogniwie dla badanego systemu BMS-A1 z aktywnym balansowaniem metodą baterii do ogniwa w temperaturze $T_o = +60^\circ\text{C}$ i wilgotności 75%, t_1 , t_2 - moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3 , t_4 - włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



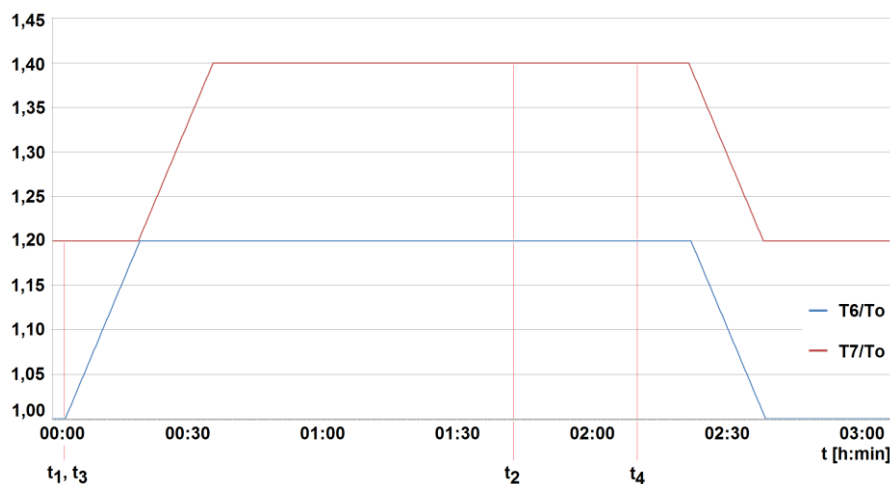
Rys. II.15. Zmienność napięcia $U_6/U_{\min}$ w czasie dla jednego ogniwa obciążonego, nieobciążonej baterii z systemem BMS-A2 z aktywnym balansowaniem metodą ogniwo do baterii (temperatura ustawiona w komorze klimatycznej $T_o = +60^\circ\text{C}$), t_1 , t_2 - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, $U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora 20V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3 , t_4 - włączanie i wyłączanie aktywnego balansowania



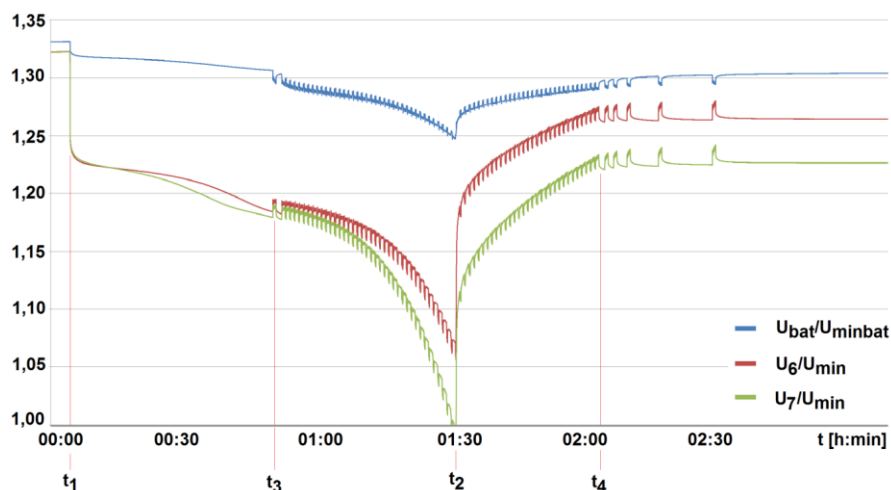
Rys. II.16. Wykres przebiegu wartości temperatury na obciążonym ogniwie dla badanego systemu BMS-A2 z aktywnym balansowaniem metodą ogniwo do baterii w temperaturze $T_o = +60^\circ\text{C}$ i wilgotności 75%, t_1 , t_2 - moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3 , t_4 - włączanie i wyłączanie aktywnego balansowania



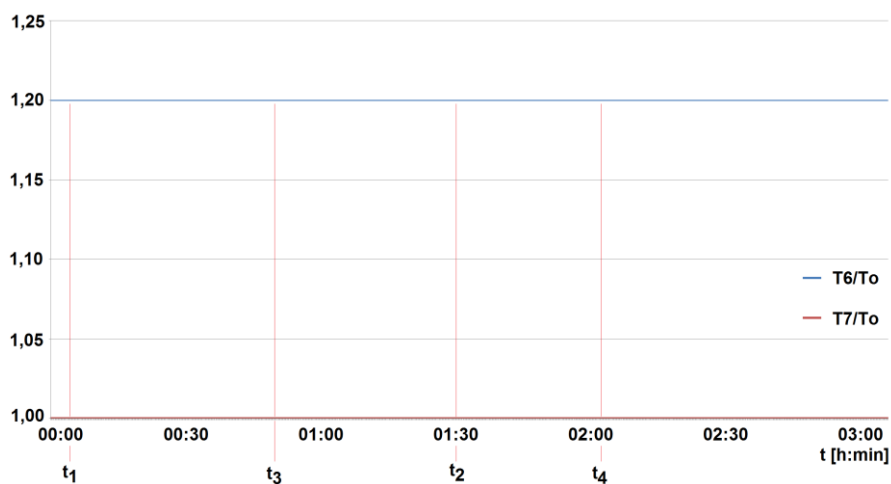
Rys. II.17. Zmienność napięcia $U_6/U_{\min}$ i $U_7/U_{\min}$ w czasie dla dwóch ogniw obciążonych, nieobciążonej baterii z systemem BMS-A1 z aktywnym balansowaniem metodą bateria do ogniwa (temperatura ustawiona w komorze klimatycznej $T_0 = +5^\circ\text{C}$), t_1, t_2 - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, $U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3, t_4 - włączanie i wyłączanie aktywnego balansowania



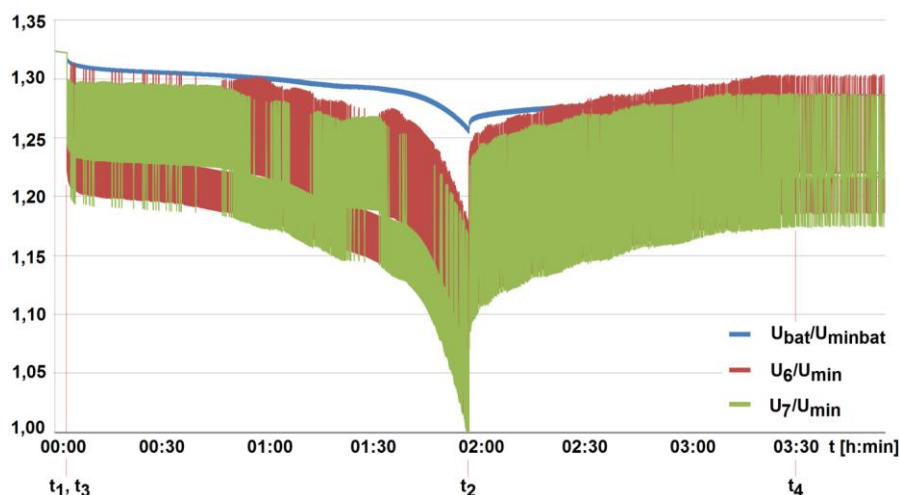
Rys. II.18. Wykres przebiegu wartości temperatury na dwóch obciążonych ogniwach dla badanego systemów BMS-A1 z balansowaniem aktywnym metodą bateria do ogniwa w temperaturze $T_0 = +5^\circ\text{C}$ i wilgotności 75%, t_1, t_2 - moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3, t_4 - włączanie i wyłączanie aktywnego balansowania



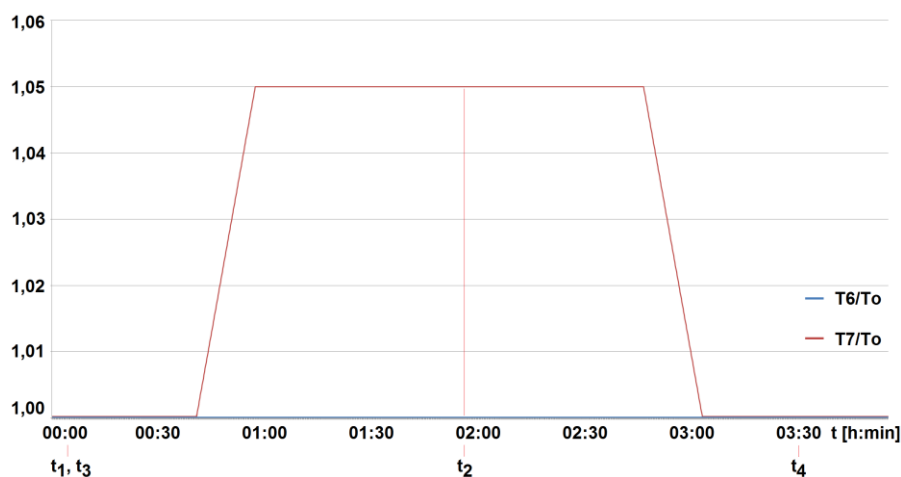
Rys. II.19 Zmienność napięcia $U_6/U_{\min}$ i $U_7/U_{\min}$ w czasie dla dwóch ogniw obciążonych, nieobciążonej baterii z systemem BMS-A2 z aktywnym balansowaniem metodą ogniwo do baterii (temperatura ustawiona w komorze klimatycznej $T_0 = +5^\circ\text{C}$), t_1 , t_2 - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, $U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3 , t_4 - włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



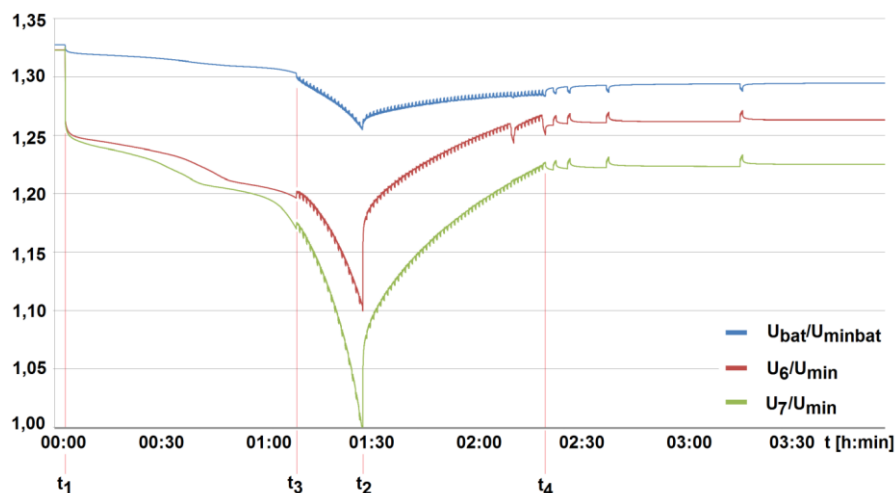
Rys. II.20. Wykres przebiegu wartości temperatury na dwóch obciążonych ogniwach dla badanych systemów BMS-A2 z balansowaniem aktywnym metodą ogniwo do baterii w temperaturze $T_0 = +5^\circ\text{C}$ i wilgotności 75%, t_1 , t_2 - moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3 , t_4 - włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



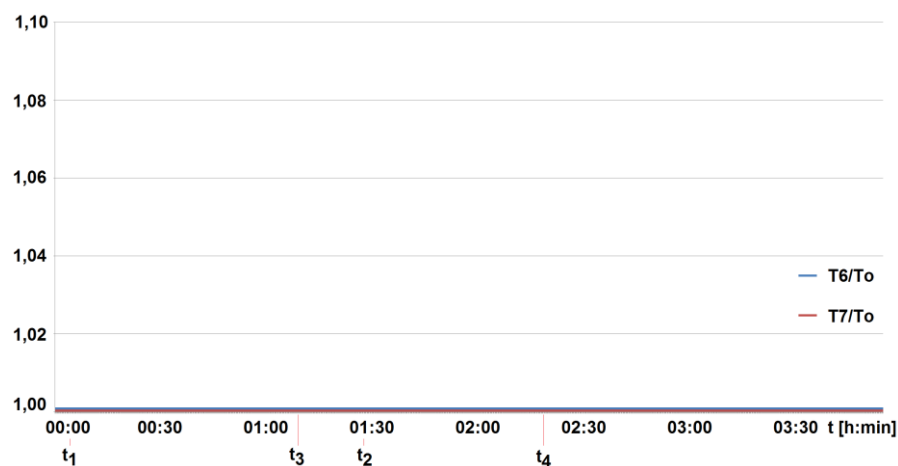
Rys. II.21. Zmienność napięcia $U_6/U_{\min}$ i $U_7/U_{\min}$ w czasie dla dwóch ogniw obciążonych, nieobciążonej baterii z systemem BMS-A1 z aktywnym balansowaniem metodą bateria do ogniwa (temperatura ustawiona w komorze klimatycznej $T_o = +20^\circ\text{C}$), t_1, t_2 - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, $U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3, t_4 - włączenie i wyłączenie aktywnego balansowania



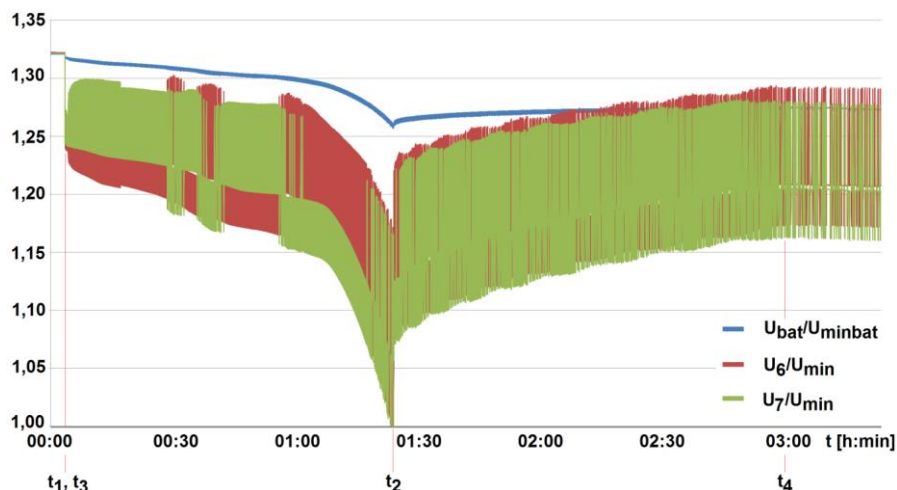
Rys. II.22. Wykres przebiegu wartości temperatury na dwóch obciążonych ogniwach dla badanego systemów BMSA1 z balansowaniem aktywnym metodą bateria do ogniwa w temperaturze $T_o = +20^\circ\text{C}$ i wilgotności 75%, t_1, t_2 - moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3, t_4 - włączenie i wyłączenie aktywnego balansowania



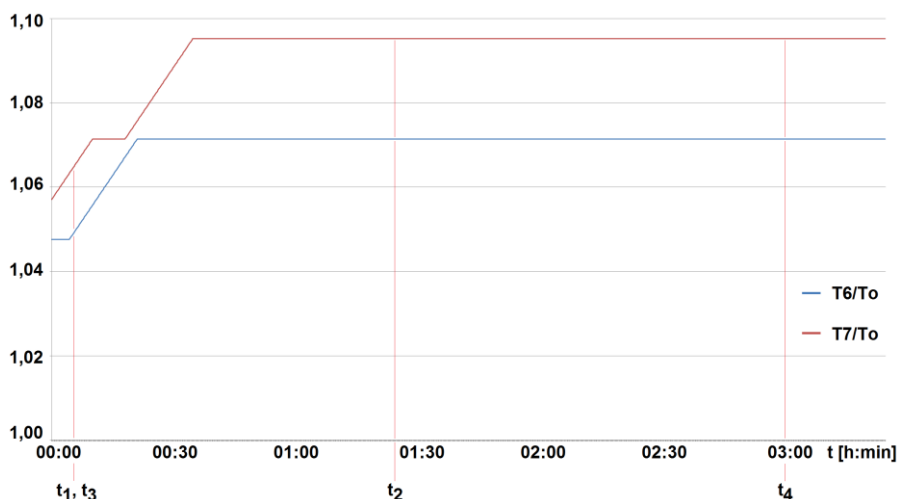
Rys. II.23. Zmienność napięcia $U_6/U_{\min}$ i $U_7/U_{\min}$ w czasie dla dwóch ogniw obciążonych, nieobciążonej baterii z systemem BMS-A2 z aktywnym balansowaniem metodą ogniwo do baterii (temperatura ustawiona w komorze klimatycznej $T_0 = +20^\circ\text{C}$), t_1 , t_2 - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, $U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3 , t_4 - włączenie i wyłączenie aktywnego balansowania



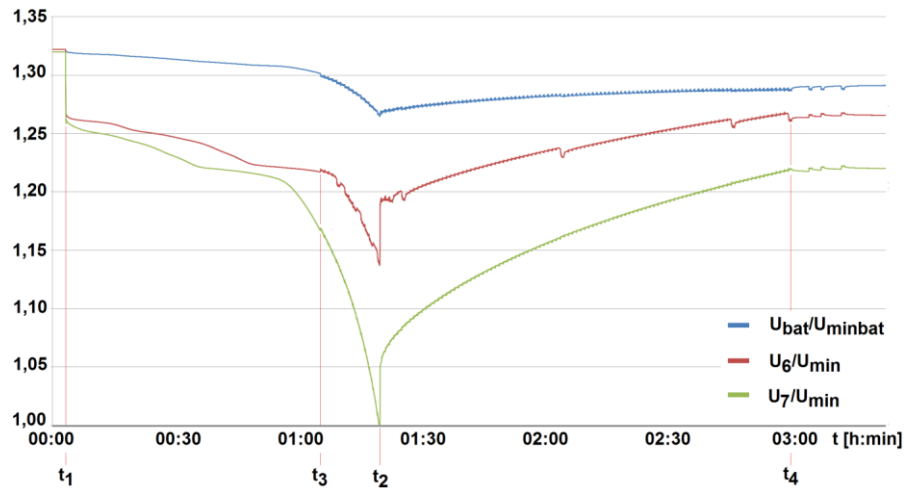
Rys. II.24. Wykres przebiegu wartości temperatury na dwóch obciążonych ogniwach dla badanych systemów BMS-A2 z balansowaniem aktywnym metodą ogniwo do baterii w temperaturze $T_0 = +20^\circ\text{C}$ i wilgotności 75%, t_1 , t_2 - moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3 , t_4 - włączenie i wyłączenie aktywnego balansowania



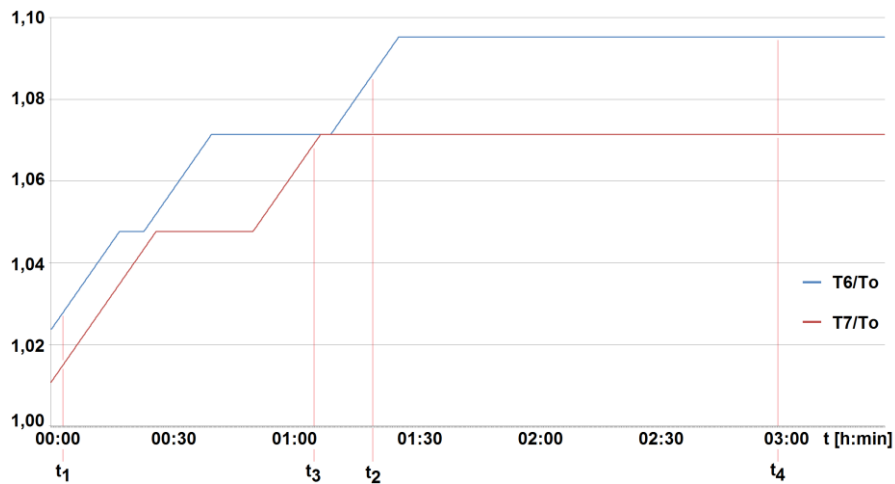
Rys. II.25. Zmienność napięcia $U_6/U_{\min}$ i $U_7/U_{\min}$ w czasie dla dwóch ogniw obciążonych, nieobciążonej baterii z systemem BMS-A1 z aktywnym balansowaniem metodą bateria do ogniwa (temperatura ustawiona w komorze klimatycznej $T_0 = +45^\circ\text{C}$), t_1, t_2 - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, $U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3, t_4 - włączenie i wyłączenie aktywnego balansowania



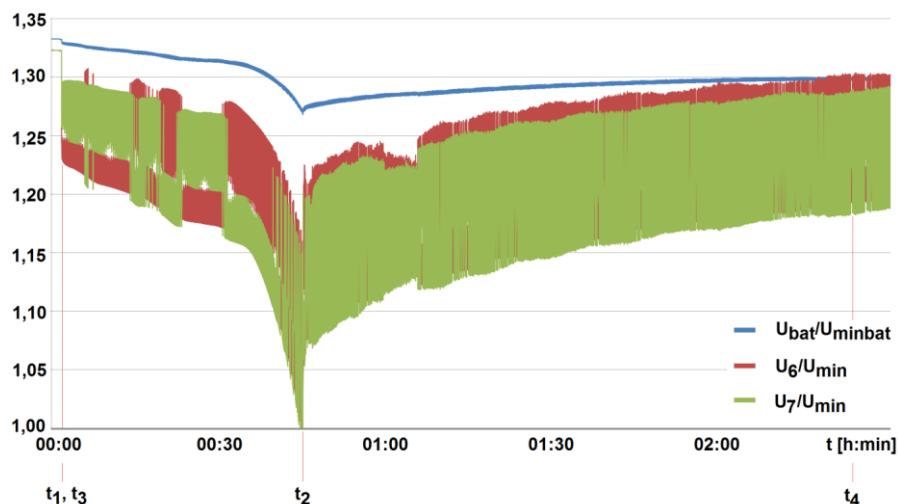
Rys. II.26. Wykres przebiegu wartości temperatury na dwóch obciążonych ogniwach dla badanego systemów BMS-A1 z balansowaniem aktywnym metodą bateria do ogniwa w temperaturze $T_0 = +45^\circ\text{C}$ i wilgotności 75%, t_1, t_2 - moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3, t_4 - włączenie i wyłączenie aktywnego balansowania



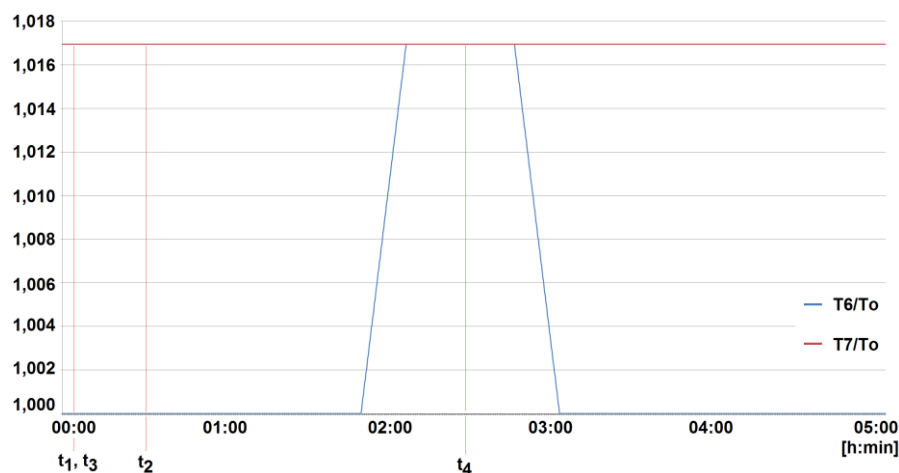
Rys. II.27. Zmienność napięcia U_6/U_{min} i U_7/U_{min} w czasie dla dwóch ogniw obciążonych, nieobciążonej baterii z systemem BMS-A2 z aktywnym balansowaniem metodą ogniwo do baterii (temperatura ustawiona w komorze klimatycznej $T_0 = +45^\circ\text{C}$), t_1 , t_2 - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, U_{min} - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, U_{minbat} - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3 , t_4 - włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



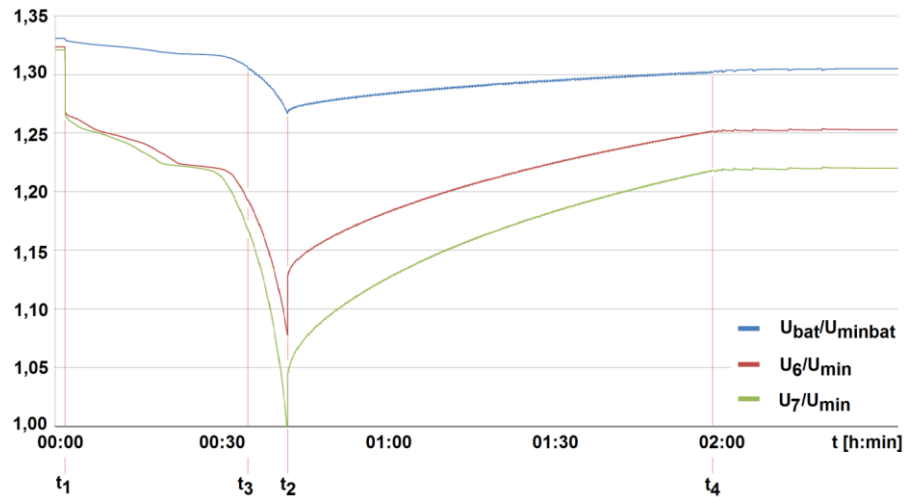
Rys. II.28. Wykres przebiegu wartości temperatury na dwóch obciążonych ogniwach dla badanych systemów BMS-A2 z balansowaniem aktywnym metodą ogniwo do baterii w temperaturze $T_0 = +45^\circ\text{C}$ i wilgotności 75%, t_1 , t_2 - moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3 , t_4 - włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



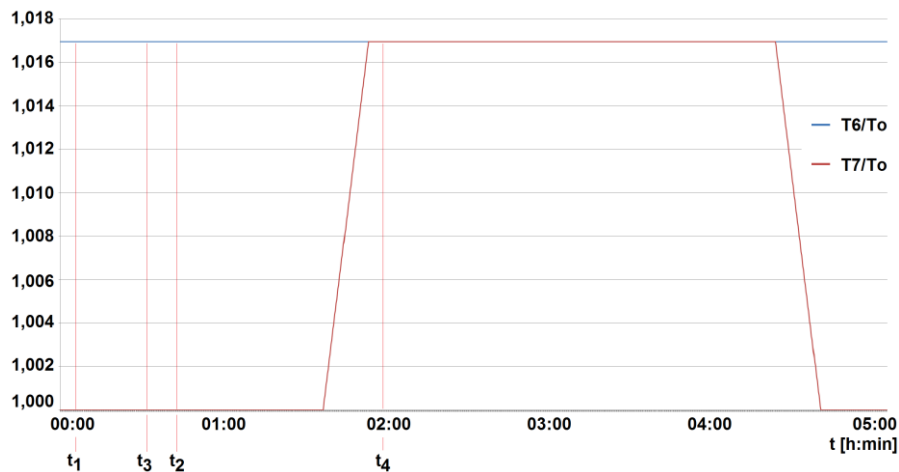
Rys. II.29. Zmienność napięcia $U_6/U_{\min}$ i $U_7/U_{\min}$ w czasie dla dwóch ogniw obciążonych, nieobciążonej baterii z systemem BMS-A1 z aktywnym balansowaniem metodą bateria do ogniwa (temperatura ustawiona w komorze klimatycznej $T_o = +60^\circ\text{C}$, t_1, t_2 - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, $U_{\min}$ - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, $U_{\min\text{bat}}$ - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3, t_4 - włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



Rys. II.30. Wykres przebiegu wartości temperatury na dwóch obciążonych ogniwach dla badanego systemów BMS-A1 z balansowaniem aktywnym metodą bateria do ogniwa w temperaturze $T_o = +60^\circ\text{C}$ i wilgotności 75%, t_1, t_2 - moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3, t_4 - włączanie i wyłączenie aktywnego balansowania



Rys. II.31. Zmienność napięcia U_6/U_{min} i U_7/U_{min} w czasie dla dwóch ogniw obciążonych, nieobciążonej baterii z systemem BMS-A2 z aktywnym balansowaniem metodą ogniwo do baterii (temperatura ustawiona w komorze klimatycznej $T_0 = +60^\circ\text{C}$), t_1 , t_2 - moment włączenia i wyłączenia obciążenia prądem 2,5 A, U_{min} - minimalne napięcie ogniwa równe 2,5 V, U_{minbat} - minimalne napięcie akumulatora 20 V, U_{bat} - napięcie akumulatora (maksymalne 29,2 V), t_3 , t_4 - włączanie i wyłączanie aktywnego balansowania



Rys. II.32. Wykres przebiegu wartości temperatury na dwóch obciążonych ogniwach dla badanych systemów BMS-A2 z balansowaniem aktywnym metodą ogniwo do baterii w temperaturze $T_0 = +60^\circ\text{C}$ i wilgotności 75%, t_1 , t_2 - moment załączenia i wyłączenia prądu obciążenia, t_3 , t_4 - włączanie i wyłączanie aktywnego balansowania

Wpływ systemu balansowania na trwałość i bezpieczeństwo pracy baterii ogniwo litowych w wybranym układzie zasilania maszyny górniczej

Streszczenie

Monografia poświęcona jest ważnej i aktualnej problematyce niezawodnej i bezpiecznej pracy urządzeń górniczych w przypadku ich zasilania z baterii litowo-żelazowo-fosforanowej. Analizuje i ocenia poziom zagrożeń dla baterii wykorzystujących wybrane ogniwa litowo-żelazowo-fosforanowe (LiFePO_4) w przemyśle węglowym. Prezentuje krytyczną analizę literaturową stosowanych na świecie rozwiązań układów balansowania (BMS) ogniwo litowych. W celu dokonania oceny przydatności wybranych ogniwo litowo-żelazowo-fosforanowych formułuje kryteria ich efektywności energetycznej i niezawodności pracy bez zastosowania oraz w przypadku współpracy baterii ogniwo z wybranymi układami balansowania tak pasywnego, jak i aktywnego. Prezentuje nowo opracowane konstrukcje dwóch modeli aktywnych układów balansujących wraz z analizą wyników przeprowadzonych badań porównawczych. W celu potwierdzenia uzyskanych wyników laboratoryjnych przeprowadzono testujące badania sprawdzające w warunkach rzeczywistych dla baterii składających się z ogniwo litowo-żelazowo-fosforanowych z aktywnym układem balansującym typu „bateria do ogniwa” zasilającym wybrany górniczy ciągnik podwieszony typu PCA-1. Przydatność opracowanej aktywnej struktury BMS porównano zarówno z aktywnym systemem BMS wykorzystującym metodę „ogniwo do baterii”, jak i z pasywnym rozwiązaniem BMS. Badania wykonano w zmiennej temperaturze otoczenia od $+5^\circ\text{C}$ do $+60^\circ\text{C}$, symulując warunki niedopasowania różnej liczby ogniwo w baterii. Szczególną uwagę zwrócono na wydajność balansowania BMS podczas symulowanego nierównomiernego rozładowania losowo wybranej liczby ogniwo (od 12,5% do około 37,5% całkowitej liczby ogniwo w akumulatorze). Na podstawie uzyskanych wyników kompleksowych badań zarówno laboratoryjnych, stanowiskowych, jak i w warunkach rzeczywistych, eksploatacyjnych, sformułowano odpowiednie wnioski i zalecenia praktyczne dotyczące możliwości zapewnienia efektywnej i bezpiecznej pracy baterii litowych w układach zasilania wybranej maszyny górniczej.

The impact of the balancing system on the durability and safety of lithium cell batteries for selected power supply systems of mining machine

Abstract

The monograph is devoted to the important and current issues of reliable and safe operation of mining equipment when powered by lithium-iron-phosphate batteries. Analyzes and assesses the level of threats using selected lithium-iron-phosphate (LiFePO₄) cells in the coal industry. Presents a critical analysis of the literature on lithium cell balancing systems (BMS) commonly used in the world. To assess the usefulness of selected lithium-iron-phosphate cells, the criteria for their energy efficiency and operational reliability without and with the use of as passive and selected active balancing systems have been formulated. The newly developed two models of active balancing systems are presented together with the analysis of the results of the comparative studies. To confirm the obtained laboratory results, respective tests were carried out under real mine conditions for batteries consisting of lithium-iron-phosphate cells with an active balancing system of the "cell battery" type powering the selected mining suspended vehicle type PCA-1. The usefulness of the developed active BMS structure was compared both with an active BMS system using the "battery cell" method and with a passive BMS solution. The tests were carried out under variable ambient temperature from + 5 °C to + 60 °C, simulating the conditions of mismatching a different number of cells in the battery. Particular attention was paid to the balancing efficiency of the BMS during the simulated uneven discharge of a randomly selected number of cells (from 12.5% to about 37.5% of the total number of cells in the battery). Based on the results of comprehensive laboratory and bench tests as well as in real operating conditions, appropriate conclusions and practical recommendations were formulated regarding the possibility of ensuring effective and safe operation of lithium batteries in the power supply systems of selected mining machine.

ISBN 978-83-65593-41-2