

dr hab. inż. Jarosław Joostberens, prof. PŚ
Katedra Elektrotechniki i Automatyki Przemysłowej
Wydział Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa
i Automatyki Przemysłowej
Politechnika Śląska w Gliwicach

Gliwice, 9 września 2022 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Wojciecha Kurpiela
pt.: „Wpływ systemu balansowania na trwałość i bezpieczeństwo
pracy baterii ogniw litowych w wybranych układach zasilania
maszyn górniczych”**

1. Charakterystyka treści rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska zawiera 151 stron w tym 123 strony stanowią zasadniczą część pracy, a pozostałe to dwa załączniki, zatytułowane odpowiednio:

Załącznik I Wyniki badań stanowiskowych systemów BMS.

Załącznik II Wyniki badań systemów BMS z aktywnym balansowaniem w komorze klimatycznej.

Tytuły tych załączników przytoczono w niniejszej recenzji z uwagi na to, że nie zostały one ujęte w spisie treści rozprawy.

Praca składa się z 8 rozdziałów zasadniczych, numerowanego wstępu oraz celu, tezy i zakresu pracy, a także wniosków, które rozdzielono na *Wnioski szczegółowe* i *Wnioski końcowe i podsumowanie*. Rozprawę uzupełniono o numerowany *spis najczęściej stosowanych oznaczeń i skrótów* oraz spis literatury, który zawiera 44 pozycje polsko- i obcojęzyczne. Rozprawa zawiera 128 rysunków, w tym 85 w części zasadniczej, a pozostałe w załącznikach. Wśród nich wyróżnić można 17 fotografii oraz 77 wykresów, przedstawiających wyniki rejestracji poszczególnych wielkości, z czego 34 przedstawiono w rozdziałach zasadniczych, a pozostałe zamieszczono w załącznikach. W pracy podano zaledwie 5 równań, w tym 3 numerowane (w tym jedno nieprawidłowo) i dwa nienumerowane. Praca nie zawiera tabel.

W rozdziale pierwszym (wstępnym) Autor skrótowo omawia wybrane maszyny służące do transportu w podziemnych zakładach górniczych takie, jak

lokomotywy spągowe i kolejki podwieszane. Słusznie wskazuje, że znacznie korzystniejszym od napędu spalinowego kolejek podwieszanych jest napęd elektryczny. Z uwagi na dostępność akumulatorów litowych, wykorzystanie silników elektrycznych do napędu górniczych ciągników podwieszanych staje się alternatywą dla napędu spalinowego. Jednak wykorzystanie napędu elektrycznego zasilanego z akumulatora litowego jak wskazuje Autor, niesie za sobą określone zagrożenia związane z niebezpieczeństwem przeładowania, nadmiernego rozładowania czy przekroczenia temperatury dopuszczalnej dla ogniw baterii. Na tej podstawie Autor podaje przyczynę podjęcia tematu, wskazując na potrzebę badań wpływu zagrożeń występujących w kopalniach na trwałość i efektywność pracy baterii litowych, przy ich zastosowaniu do zasilania napędu elektrycznego *wybranych maszyn górniczych*.

Na podstawie podanego w rozdziale pierwszym powodu podjęcia tematu, w rozdziale drugim sformułowano cel oraz tezę rozprawy doktorskiej.

Za cel pracy (podany w podrozdz. 2.1) Autor przyjął *„przeprowadzenie kompleksowych badań wpływu warunków kopalnianych na pracę ogniw litowych, na podstawie których można by było stwierdzić realną możliwość i/lub zakres niezawodnego wykorzystania wytypowanych baterii litowo-żelazowo-fosforanowych (LiFePO₄) do zasilania wybranego podwieszanego pojazdu górniczego. Spełnienie tego oczekiwania jest jednak możliwe dzięki zastosowaniu opracowanej przez autora specjalnej struktury aktywnego układu BMS”*. Następnie w podrozdziale 2.2 sformułowano tezę pracy: *Zastosowanie odpowiedniego do wymagań eksploatacyjnych i środowiskowych układu aktywnego balansowania ogniw litowych metodą baterii do ogniwa pozwala na uzyskanie wymaganej w warunkach górniczych trwałości i niezawodności pracy układów zasilania maszyn górniczych*.

Dalej, w podrozdziale 2.3, omówiono zakres pracy, nie podając numerów rozdziałów, w których zawarte są poszczególne elementy składowe rozprawy.

Rozdział 3 zawiera opis parametrów akumulatorów, ich budowy, zasady działania oraz zagrożeń powodowanych ich eksploatacją. Omówiono tam również sposoby łączenia baterii. Rozdział 4. zawiera przegląd najczęściej stosowanych metod ładowania akumulatorów litowych. W rozdziale 5. Autor rozprawy opisuje występujące w podziemiach kopalń narażenia środowiskowe oraz zagrożenia powodowane przez użytkowanie urządzeń elektrycznych w wyrobiskach z uwzględnieniem akumulatorów litowych. W rozdziale 6. omówiono metody

balansowania ogniw litowych. Podano tam podział tych metod, schematy ideowe oraz zasady działania systemów balansowania. W rozdziale siódmym przedstawiono kryteria oceny stosowania ogniw litowych w odniesieniu do górnictwa węgla kamiennego. Jako kryteria podano *trwałość*, *bezpieczeństwo* i *efektywność energetyczną*. Chodzi więc o *trwałość* akumulatora (ogniwa), *bezpieczeństwo* użytkowania akumulatora (ogniwa) – zapewniane przez utrzymywanie napięć na poszczególnych ogniwach w dopuszczalnym zakresie, a więc uniemożliwienie nadmiernego rozładowania lub przeładowania ogniw oraz niedopuszczenie do ich nagrzania powyżej temperatury dopuszczalnej. Nie do końca jasno Autor sformułował jak rozumie *efektywność energetyczną* na podstawie definicji, którą w rozdziale przytoczył, w odniesieniu do akumulatora litowego. Należy chyba w tym przypadku rozumieć, że będzie to wydłużenie pracy akumulatora z zastosowanym BMS w stosunku do akumulatora bez tego układu w sytuacji, gdy oba źródła będą identycznie obciążone.

Rozdział ósmy jest jednym z trzech rozdziałów zasadniczych rozprawy. Jest on najobszerniejszy – składa się z 37 stron, co stanowi blisko 25% objętości całej pracy. Podano w nim zakres badań obejmujący cztery etapy. W pierwszym etapie Autor zaplanował badania wpływu prądu obciążenia na rozkład temperatury na obudowie ogniwa oraz oddziaływania temperatury otoczenia na ogniwo obciążone prądem o stałej wartości. Etap II obejmował badania porównawcze wykorzystania układu BMS bazującego na metodzie nazwanej bateria do ogniwa do balansowania akumulatora, złożonego z ogniw o pojemności 10 Ah w porównaniu do układów BMS pracujących: metodą określoną jako ogniwo do baterii oraz balansowania pasywnego. W trzecim etapie przewidziano szczegółowe badania układu balansowania BMS metodą bateria do ogniwa, przeznaczonego do współpracy z akumulatorem litowym, składającym się z 15 ogniw, stanowiącym odwzorowanie w skali źródła energii elektrycznej dla ciągnika podwieszanego typu PCA-1. W ostatnim przewidzianym etapie badań, czyli czwartym, podobnie jak w trzecim, zaplanowano badania pracy układu balansowania BMS metodą bateria do ogniwa akumulatora (obciążanego prądem 53 A) o pojemności dwunastokrotnie większej niż w etapie trzecim (120 Ah), który jest przeznaczony do zasilania napędu elektrycznego ciągnika podwieszanego PCA-1. Etap trzeci i czwarty opisano w rozdziale 8, ale wyniki eksperymentów, dotyczące tych etapów znajdują się w kolejnych rozdziałach.

W rozdziale ósmym opisano układy BMS, podano schematy ideowe, algorytm działania oraz pokazano elementy składowe samego urządzenia, jak i stanowiska badawczego. W rozdziale tym na podstawie rezultatów przeprowadzonych badań pojedynczego ogniwa, dotyczących jego nagrzewania w wyniku obciążenia stałym prądem w temperaturze otoczenia i w temperaturach od niej różnych oraz sytuacji głębokiego rozładowania, Autor stwierdza jego przydatność jako źródła zasilania wybranych maszyn górniczych, ale wskazuje na konieczność zastosowania urządzenia BMS. W podrozdziale 8.2 Doktorant opisuje eksperymenty porównawcze z wykorzystaniem trzech ośmioogniwowych akumulatorów w celu oceny skuteczności balansowania pasywnego oraz metodami bateria do ogniwa, ogniwo do baterii oraz przedstawia, ale wyłącznie w formie graficznej, uzyskane rezultaty tych doświadczeń. Na podstawie uzyskanych wyników Doktorant wysnuwa wniosek, że wyraźnie lepsze rezultaty – w porównaniu do pozostałych systemów balansowania – daje BMS jego autorstwa, wykorzystujący metodę bateria do ogniwa, oznaczoną jako BMS-A1, niezależnie od temperatury otoczenia i jego wilgotności (dwie wartości 40% i 75%). Na podstawie wyników badań z rozdziału ósmego, w rozdziale dziewiątym Autor stosuje system BMS metodą bateria do ogniwa dla akumulatora złożonego z 15 ogniw, stanowiącego model w skali, akumulatorowego źródła zasilania ciągnika PCA-1, jako wybranej maszyny górniczej. Rozdział ten zawiera schemat blokowy systemu BMS, opis analogicznych, jak w rozdziale 8.2, warunków eksperymentów oraz prezentuje w formie wykresów uzyskane wyniki. Na koniec rozdziału podaje wnioski, wskazując na aktywny system BMS metodą bateria – ogniwo jako najlepsze rozwiązanie techniczne do balansowania ogniw akumulatora, zasilającego napęd elektryczny podwieszanego ciągnika. W rozdziale dziesiątym znajduje się opis ciągnika PCA-1, jako maszyny górniczej zasilanej ze źródła w postaci akumulatora, składającego się z 15 ogniw o pojemności 120 Ah. W rozdziale tym Doktorant prezentuje schemat blokowy układu do testowania systemu BMS oraz wyniki aktywnego balansowania ogniw tego akumulatora metodą bateria do ogniwa, przy czym program i warunki eksperymentów były podobne jak w rozdziale 9. z tą różnicą, że akumulator obciążono odbiornikiem rezystancyjnym pobierającym prąd 53 A. Z uwagi na przyjętą zbyt małą wartość prądu balansowania uzyskano nieznaczne wydłużenie czasu rozładowania akumulatora w porównaniu do baterii z ogniwami 10 Ah. Wyniki pokazały również pozytywny wpływ pracy systemu BMS na poziom napięcia na zaciskach akumulatora, ale dopiero po wyłączeniu

obciążenia. Rozdział jedenasty zawiera konkluzje, które w znacznej mierze stanowią kopię wniosków formułowanych w rozdziałach od ósmego do dziesiątego. Podsumowujący rozdział 12. zawiera wnioski końcowe. Jako trzynasty rozdział wprowadzono *Wykaz najczęściej stosowanych oznaczeń i skrótów*.

2. Uwagi merytoryczne o wartości rozprawy

Doktorant trafnie uzasadnił potrzebę podjęcia tematu. Obserwowany w ostatnich latach bardzo szybki rozwój akumulatorów litowych, zwłaszcza tych zbudowanych z ogniw o znacznych pojemnościach, rozszerza możliwości zasilania napędów elektrycznych wybranych maszyn górniczych. Wśród nich szczególnie wyróżniają się kolejki podwieszane, które należą do szybko rozwijających się maszyn górniczych transportowych. Akumulatory litowe umożliwiają zastąpienie napędu spalinowego ciągnika podwieszanego silnikami elektrycznymi. Jednak eksploatacja baterii litowych musi spełniać wymogi bezpieczeństwa i być ekonomicznie uzasadniona. Autor rozprawy wskazuje, że wykorzystanie akumulatorów litowych musi występować w ściśle określonych przez producenta warunkach prądowo-napięciowych oraz temperaturowych, a jednocześnie pożądana byłaby jak najdłuższa ich praca w tych dopuszczalnych zakresach. W podziemnych zakładach górniczych z uwagi na panujące tam warunki wymagania te są trudne, ale możliwe do spełnienia. Jak stwierdza Doktorant można je osiągnąć stosując odpowiednio zaprojektowany i wykonany System Zarządzania Baterią (system BMS), kontrolujący i równoważący poziomy napięć poszczególnych ogniw akumulatora.

Ustosunkowując się do tytułu pracy, postawionej tezy i celu uważam, że występują w nich nieścisłości. Temat pracy brzmi „Wpływ systemu balansowania na trwałość i bezpieczeństwo pracy baterii ogniw litowych w wybranych układach zasilania maszyn górniczych”. Tymczasem w podrozdz. 2.1 czytamy: *Celem pracy było przeprowadzenie odpowiednich kompleksowych badań wpływu warunków kopalnianych na pracę ogniw litowych, na podstawie których można by było stwierdzić realną możliwość i/lub zakres niezawodnego wykorzystania wytypowanych baterii litowo-żelazowo-fosforanowych (LiFePO₄) do zasilania wybranego podwieszanego pojazdu górniczego. Spełnienie tego oczekiwania jest jednak możliwe dzięki zastosowaniu opracowanej przez autora specjalnej struktury aktywnego układu BMS*. Następuje więc ograniczenie celu pracy do jednej maszyny,

czyli podwieszanego pojazdu górniczego. Autor nie podał powodu takiego ograniczenia tematu pracy. Należy tu również zwrócić uwagę, że w tytule jak i w tezie rozprawy mówi się o *układach zasilania maszyn górniczych*, a nie *układach zasilania maszyny górniczej*.

W mojej ocenie sformułowanie celu pracy również zawiera nieścisłości, bowiem napisano „(...) *na podstawie których można by było stwierdzić realną możliwość i/lub zakres niezawodnego wykorzystania wytypowanych baterii litowo-żelazowo-fosforanowych (...)*”. Czy *możliwość* może być nierealna? *Możliwość* to stwierdzenie, że coś jest realne (możliwe). Ponadto z tego sformułowania wynika, że:

a) „(...) *na podstawie których można by było stwierdzić realną możliwość i zakres niezawodnego wykorzystania wytypowanych baterii (...)*”,

b) „(...) *na podstawie których można by było stwierdzić realną możliwość lub zakres niezawodnego wykorzystania wytypowanych baterii (...)*”.

Jeżeli nie byłoby możliwości to nie istniałby zakres *niezawodnego wykorzystania* w tym przypadku *akumulatora*. Dalej dekompozycja zdania z podpunktu b) prowadzi do następujących form:

„(...) *na podstawie których można by było stwierdzić realną możliwość niezawodnego wykorzystania (...)*” lub „(...) *na podstawie których można by było stwierdzić zakres niezawodnego wykorzystania (...)*”. Zakres zwykle się definiuje, określa, wyznacza a nie stwierdza.

Uważam, że precyzyjniejsze brzmienie miałyby np. takie zdanie:

Celem pracy było przeprowadzenie badań wpływu określonych warunków kopalnianych na pracę ogniw litowych, dla wyznaczenia zakresu niezawodnego wykorzystania baterii litowo-żelazowo-fosforanowych (LiFePO₄) do zasilania wybranego podwieszanego pojazdu górniczego.

Należy stwierdzić, że Doktorant wykazał dostateczną wiedzę teoretyczną z zakresu warunków środowiskowych występujących w wyrobiskach podziemnych zakładów górniczych i powodowanych przez nie narażeń, a także zagrożeń wynikających z użytkowania urządzeń elektrycznych w tych pomieszczeniach, co opisuje w rozdziale piątym pracy. W tym aspekcie zwrócił on uwagę na zagrożenia, które może powodować eksploatacja akumulatorów litowych, a w szczególności wynikające z ich nagrzewania i nierównomiernego rozładowywania się poszczególnych ogniw. Znajomość zagadnień związanych

z zasadą działania, użytkowaniem elektrochemicznych źródeł energii elektrycznej w podziemiach kopalń oraz zagrożeń powodowanych przez ich eksploatację poruszone w rozdziałach trzecim i czwartym wskazują na ugruntowaną wiedzę Autora rozprawy w tym zakresie. Na tej podstawie można pozytywnie ocenić ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*.

Do najważniejszych osiągnięć pracy zaliczam:

1) Wykonanie pracochłonnych, wieloaspektowych badań empirycznych dotyczących ogniwa litowo-żelazowo-fosforanowego typu Headway LFP38120(S) (dalej zwanego ogniwem litowym) i przeprowadzenie wnioskowania w tym zakresie.

2) Przeprowadzenie badań pomiarowych ośmioogniwowych akumulatorów zmierzające do oceny skuteczności stosowania różnych systemów BMS przy użytkowaniu tej baterii w sytuacji niesymetrycznego obciążenia ogniw oraz przy wybranych temperaturach otoczenia z zakresu (+5°C,...+60°C) i stałej wilgotności powietrza równej 75% .

3) Przeprowadzenie badań pomiarowych i analizy porównawczej wyników opracowanego przez Autora systemu BMS z aktywnym balansowaniem metodą bateria do ogniwa, przeznaczonego do współpracy z piętnastoogniwowym akumulatorem, stanowiącym odwzorowanie w skali akumulatora, stosowanego jako źródło zasilania napędu elektrycznego ciągnika podwieszanego typu PCA-1.

Ad.1) Prowadzone przez Autora badania pojedynczego ogniwa ukierunkowane były na ocenę jego pracy w różnych warunkach klimatycznych, które w pewnym stopniu miały odwzorowywać warunki środowiskowe podziemi kopalń. W tym zakresie Doktorant przeprowadził ocenę wpływu:

- różnych wartości prądu obciążenia na rozkład temperatur na pojedynczym ogniwie litowym, przy stałych warunkach zewnętrznych (temperatura, wilgotność),

- temperatury otoczenia przy wilgotności względnej 75% na pracę (na czas rozładowania do dopuszczalnej minimalnej wartości napięcia) ogniwa obciążonego prądem o stałej wartości (ok. 40% wartości standardowej),

- nieznacznego przeładowania ogniwa (do napięcia równego $1,37U_n$), oraz krótkotrwałego jednorazowego głębokiego rozładowania ogniwa na jego nagrzewanie się.

Część z tych badań Autor przeprowadził wykorzystując komorę klimatyczną, a pogorszone warunki chłodzenia ogniwa zasymulował, umieszczając je w obudowie ze styropianu. Na podstawie uzyskanych wyników doszedł do wniosku, że w przypadku obciążenia prądem do 50% wartości standardowej (prądu ładowania) przyrost temperatury nie osiąga wartości niebezpiecznie dużych. Zauważył również, że w temperaturach otoczenia, podwyższonych w stosunku temperatury pokojowej, a więc w zakresie od $+20^{\circ}\text{C}$ do $+60^{\circ}\text{C}$ oraz przy jednocześnie znacznej wilgotności względnej (75%), dla prądów obciążenia nie większych niż 40% wartości standardowej czas rozładowania ogniwa do dopuszczalnego napięcia minimalnego jest porównywalny. Jedynie istotnie obniżona wartość temperatury otoczenia, do ok. kilku stopni Celsjusza powyżej zera, prowadzi do jego skrócenia, co jest faktem powszechnie znanym. Zauważył natomiast, że przypadkowe krótkotrwałe przeładowanie czy też nadmierne rozładowanie ogniwa nie niesie za sobą poważnych konsekwencji w postaci niedopuszczalnego wzrostu jego temperatury. Trafnie jednak stwierdził, że z uwagi na przebieg temperatury w sytuacji częstych tego typu nieprawidłowości może zaistnieć niebezpieczeństwo przekroczenia temperatury dopuszczalnej ogniwa i akumulatora, a w konsekwencji spowodować zagrożenie pożarowe, rażeniowe i wybuchowe. Należałoby zatem zapytać Doktoranta dlaczego nie podjął próby przeprowadzenia takich badań, szczególnie w symulowanej atmosferze kopalnianej.

Ad. 2) Autor wykazał, że zastosowanie systemów BMS w temperaturze pokojowej ($T_o = +20^{\circ}\text{C}$) w sytuacji niesymetrycznego obciążenia ogniów prowadzi do wydłużenia czasu pracy akumulatora (przy jednym ładowaniu) w stosunku do akumulatora pozbawionego takiego systemu czy zastosowania pasywnego systemu BMS. Słusznie stwierdził, że najlepsze rezultaty w tym zakresie daje wykorzystanie systemu BMS z aktywnym balansowaniem metodą baterii do ogniwa.

Wyniki dalszych badań wykonanych w części z użyciem komory klimatycznej i z pominięciem pasywnego systemu BMS pokazały, że prawidłowa eksploatacja baterii litowych w różnych warunkach temperaturowych (dla przyjętego zakresu) nie powoduje nadmiernego nagrzewania się ogniów, a stosowanie systemu BMS z aktywnym balansowaniem metodą baterii do ogniwa daje korzyść w postaci

wydłużenia pracy akumulatora (przy pojedynczym ładowaniu) w stosunku do systemu BMS z aktywnym balansowaniem metodą ogniwo do baterii, co jest zbieżne z postawioną tezą rozprawy.

Ad. 3) W akumulatorze zastosowano te same ogniwa, co w prowadzonych wcześniej badaniach, a więc o stosunkowo małej pojemności 10 Ah, a ich liczba odpowiada zestawowi ogniw akumulatora, przeznaczonego do zasilania napędu elektrycznego maszyny górniczej. Wyniki badań pokazały, że autorski system BMS poprawnie współpracuje z akumulatorem złożonym z 15 ogniw, zapewniając znaczące wydłużenie czasu rozładowania akumulatora (przy pojedynczym naładowaniu) w stosunku do pracy akumulatora bez systemu balansowania.

Następnie Doktorant zastosował ten sam system BMS do współpracy z akumulatorem przeznaczonym do zasilania napędu elektrycznego ciągnika PCA-1, a więc składającym się z ogniw o pojemności 120 Ah. W tych badaniach akumulator obciążono odbiornikiem rezystancyjnym, wymuszając przepływ prądu obciążenia 53 A. Autor wykazał poprawną pracę systemu BMS, natomiast efektu wydłużenia pracy akumulatora nie uzyskano z uwagi na zbyt małą wartość prądu balansowania. Badania przeprowadzone z wykorzystaniem obu akumulatorów odbywały się w temperaturze pokojowej. Nie stwierdzono istotnych i niebezpiecznych przyrostów temperatury wynikających z zastosowania systemu BMS.

Autor wykazał się znaczną dojrzałością i samodzielnością prowadzenia pracy naukowej planując zakres i przebieg eksperymentów, dobierając odpowiednie środki techniczne do ich realizacji oraz przeprowadzając je w pełnym przewidzianym zakresie. To spostrzeżenie potwierdzają przeprowadzone przez Doktoranta: analiza porównawcza wyników tych badań oraz wnioskowanie zawarte w przedłożonej rozprawie.

Przeprowadzone badania mają wieloaspektowy charakter poznawczy, dotyczą stosowania akumulatorów zbudowanych z ogniw litowych, służących do zasilania napędu elektrycznego maszyny górniczej, a więc pracujących w specyficznych warunkach podziemi kopalń. Wyniki tych badań wykazały, że zastosowanie układu aktywnego balansowania metodą bateria do ogniwa nie powoduje niebezpiecznego nagrzania się ogniw, chroni przed ich głębokim rozładowaniem i wydłuża czas pracy akumulatora przy pojedynczym naładowaniu (w stosunku do braku systemu BMS),

a więc umożliwia odpowiednio dłuższe zasilanie napędu elektrycznego maszyny górniczej. W tym kontekście uzyskuje się odpowiednią trwałość i niezawodność akumulatora jako źródła zasilania napędu elektrycznego maszyny górniczej, co wskazuje na zrealizowanie zasadniczego celu pracy i udowodnienie postawionej w rozprawie tezy.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne oraz dostrzeżone omyłki

Rzetelna ocena rozprawy wymaga stwierdzenia, że Autor nie wykazał należytej staranności przy sporządzaniu tekstu rozprawy doktorskiej. Najsłabszą stroną pracy jest jej strona redakcyjna, struktura i używany język. W pracy występuje szereg uchybień formalnych, utrudniających pełną ocenę zawartości merytorycznej. Poniżej przedstawiono najważniejsze z nich, a także uwagi merytoryczne.

Wszystkie uwagi sporządzono zgodnie z chronologicznym układem rozprawy. Ponadto na końcu podano kilka spostrzeżeń i dodatkowych uwag krytycznych.

- 1) Rozprawa nie zawiera rozdziału, który stanowiłby przegląd literaturowy w ujęciu klasycznym. W pewnym zakresie jego rolę pełnią wstęp oraz rozdziały od trzeciego do szóstego włącznie. Niestety w rozdziałach czwartym i piątym nie znajdziemy żadnych powołań na źródła literaturowe. Uważam, że jest to istotne uchybienie rozprawy. Jest to tym bardziej niezrozumiałe, że Autor już w pierwszym zdaniu rozdziału piątego pisze: „Rodzaje podstawowych zagrożeń, których nasilenie i możliwe skutki są szczególnie duże w górnictwie, oraz kryteria ich oceny ujęte są w odpowiednich postanowieniach przepisów prawa górniczego”. Natomiast Doktorant nie przeprowadził analizy przepisowo-normalizacyjnej w przedmiotowym zakresie z powołaniem na właściwe źródła. Kolejny przykład: „W wyniku analizy wieloletnich danych statystycznych można stwierdzić, że urządzenia elektryczne były przyczyną średnio jednej trzeciej wszystkich wybuchów metanu oraz pyłu węglowego w kopalniach (...)”. Zdanie to znajduje się w podrozdziale 5.2. bez odniesienia do źródła. Takich przykładów również w rozdziałach 3. i 4. można znaleźć więcej.

- 2) Podrozdział 2.3, str. 9 (przedostatnie zdanie)
„Dużo uwagi poświęcono problemowi wydajności balansowania BMS podczas symulowanego nierównomiernego rozładowania losowo wybranych ogniw (od 12% do około 40% całkowitej liczby ogniw w akumulatorze).”
Autor pisze o *wybranych losowo ogniwach*. Podobne sformułowania pojawiają się w rozdziałach 8 (str. 73), 9 (str. 90) oraz we wnioskach szczegółowych (str. 112). Na czym polegał ich losowy wybór, jeżeli np. na rysunku 8.22 widać, że obciążane niesymetrycznie są ogniwa od 5 do 7?
- 3) Podrozdz. 3.1.2, str. 13, (czwarty wiersz od dołu strony).
Napisano „(...) *nietoksycznym, a pond to (...)*”.
Powinno być „(...) *nietoksycznym, a ponadto (...)*”. Jest to błąd ortograficzny.
- 4) Podrozdz. 3.1.3.2, str. 21 (wiersz trzeci od dołu strony)
Napisano „*Ze powyższych powodów (...)*”. Powinno być „*Z powyższych powodów (...)*”.
- 5) Podrozdz. 4.1, str. 23, (dziesiąty wiersz od dołu strony)
Wyróżniony tytuł brzmi: „*Ładowanie przy stałej wartości napięciu*”. Powinno być: „*Ładowanie przy stałej wartości napięcia*”.
- 6) Podrozdz. 4.1, str. 25, (piąty wiersz)
„Czas przerwy każdego okresu impulsu pozwala ionom dyfundować przez materiały elektrod, zwiększając wydajność procesu”.
Powinno być: „Czas przerwy każdego okresu impulsu pozwala jonom dyfundować przez materiały elektrod, zwiększając wydajność procesu”.
- 7) Wzór (4.2) nie posiada opisu wielkości w nim występujących.
- 8) Podrozdz. 4.1, str. 25, (drugie zdanie pod wzorem (4.2))
„Dobierając więc odpowiednią częstotliwość impulsów można zminimalizować impedancję ładowania, co zmaksymalizuje prąd ładowania, umożliwiając szybsze ładowanie”.
W jednym zdaniu występuje trzykrotnie słowo „ładowanie” (lub jego odmiana). Zdanie to można przereklamować np. do postaci: „Dobierając odpowiednią częstotliwość impulsów można zminimalizować impedancję (4.2), co zmaksymalizuje wartość prądu i przyczyni się do skrócenia czasu ładowania baterii”.

- 9) Podrozdz. 4.1, str. 25, (dziesiąty i szósty wiersz od dołu strony).
„(...) ładowanie impulsowe jest bardziej wydajne niż ładowanie ze 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”.
„Jeśli dobór częstotliwości i współczynnika wypełnienia nie został odpowiednio wykonany, może to poważnie pogorszyć żywotność akumulatora, jak miało to miejsce dla współczynnika wypełnienia 0,2, ze względu na duże impulsy prądowe”.
Autor nie poparł powyższych stwierdzeń ani powołaniem na konkretne źródło, ani nie pokazał wyliczeń lub wyników potwierdzających te sformułowania.
- 10) W rozdziale piątym Doktorant opisując zagrożenia powodowane przez użycie akumulatorów litowych w wyrobiskach podziemnych nie wspomniał o kwestii zwarć doziemnych, a w szczególności obniżenia się rezystancji izolacji doziemnej od bieguna dodatniego lub ujemnego baterii. Nie odniósł się do zagadnienia zabezpieczeń od skutków tego stanu zakłóceniewego. Nie poruszył również kwestii narażeń mechanicznych, prowadzących np. do uszkodzenia obudowy ogniwa i skutków jakie wywołałaby to zdarzenie.
- 11) Rozdział 5., str. 27, (jedenasty wiersz od dołu strony)
„Ich źródłem mogą być częściowo również przyczyny naturalne, jak np. prądy błędzące w ziemi (...)”. Prądy błędzące nie są zjawiskiem naturalnym, ale skutkiem eksploatacji trakcji elektrycznej lub zaistniałych doziemień. Są jednym z zagrożeń elektrycznych.
- 12) Rozdział 5., str. 30, (pierwszy wiersz)
„Należy podkreślić, że w warunkach podziemi kopalń szczególnie istotna jest koordynacja ochrony środowiskowej”.
Nie jest jasne co Autor rozumie pod pojęciem *koordynacja ochrony środowiskowej* – nie jest to wyjaśnione w tekście rozprawy. Na tej samej stronie w podrozdz. 5.1.1. Autor podaje definicję narażenia, a ściślej mówiąc *narażenia zawodowego* nie podając źródła.
- 13) Podrozdz. 5.1.2, str. 33, (przedostatni wiersz podrozdziału)
„(...) zakłócenia w pracy innych urządzeń, szczególnie łączności sygnalizacji i sterowania, wywołane polarni elektrycznymi i magnetycznymi.”

Powinno być „(...) wywołane polami elektrycznymi i magnetycznymi”, a ściślej mówiąc elektromagnetycznymi.

- 14) W podrozdziale 5.1.2.1 Autor podał podział pomieszczeń wyrobisk zagrożonych wybuchem pyłu węglowego, jako stopnie zagrożenia zaczerpnięte prawdopodobnie z (Krasucki F., 1984). Tymczasem aktualnym w tym zakresie jest akt prawny w postaci *Obwieszczenia 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 r. poz. 1617), w którym podaje się dwie klasy (A i B) zagrożenia wybuchem pyłu węglowego. Niezrozumiałe jest więc, dlaczego Doktorant nie sięgnął do tego źródła.

- 15) Podrozdz. 5.1.2.2, str. 34, (drugi akapit)

„Zapalenie materiałów palnych w pomieszczeniach, w których instalowane są urządzenia elektryczne, w ogólnym przypadku ma być wynikiem działania prądu upływu i przeciążeń długotrwałych oraz zwarć, szczególnie łukowych”.

Co Autor rozumie pod pojęciem *prądu upływu*? Jeżeli jest to prąd ziemnozwarciowy to w podziemiach kopalń doziemienie traktowane jest jak zwarcie i musi zostać wyłączone bezzwłocznie w ten sposób ograniczane jest zagrożenie rażeniowe, pożarowe i wybuchowe.

- 16) Podrozdz. 6.1.2., str. 37/38 (ostatni wiersz)

„Jeżeli napięcie któregoś z ogniw znacząco przekroczy wartość pozostałych, to zostaje zamknięty odpowiedni wyłącznik. (...) Ideę układu połączeń pasywnego równoważenia ogniw przedstawiono na rys. 6.2”

Termin wyłącznik odnosi się do łącznika, który służy do załączania i wyłączania prądów roboczych i samoczynnego wyłączania prądów zwarciovych i przeciążeniowych. Posiada dużą lub bardzo dużą zdolność wyłączalną, a więc zdolność do gaszenia łuku elektrycznego. W tym przypadku nie mamy do czynienia z takim łącznikiem. W miejsce wyłącznika wystarczyło podać *łącznik*.

Na rysunku 6.2 nie narysowano łączników, więc jak się ten schemat ma do zdania, które poprzednio omówiono?

- 17) Podrozdz. 6.1.2., str. 38 (siódmy wiersz)

„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 nadwyżka energii zgromadzona w niezrównoważonych ogniwach tracona jest w rezystorze na ciepło”.

Nieprecyzyjne sformułowania powodują, że zdanie staje się niejasne lub stwarza wrażenie wewnętrznie sprzecznego. Jak pasywne równoważenie ogniw ma być rozwiązaniem (sposobem) tanim, skoro ma niską sprawność, a więc powstają znaczne straty energii. Pewnie chodzi o konstrukcję i cenę takiego zestawu.

18) Podrozdz. 6.1.2., str. 38 (dziesiąty wiersz)

„Oprócz tego całkowita pojemność zestawu baterii jest ograniczona koniecznością dostosowania poziomu naładowania ogniw do pojemności "najsłabszego" z nich”.

Co Autor rozumie pod pojęciem *najsłabsze ogniwo* baterii? Nie zostało to wyjaśnione.

19) Podrozdz. 6.1.2., str. 38 (piąty wiersz od dołu strony)

„Wyrównywanie przeładowywania w tej metodzie jest skuteczne ale tylko w przypadku małej liczby ogniw połączonych szeregowo. Trudność balansowania bowiem wzrasta wykładniczo z ilością połączonych szeregowo ogniw.” Podobne sformułowanie zostało zawarte w rozdziale 12. we *Wnioskach końcowych i podsumowaniu* na stronie 116.

Autor pisze o małej liczbie ogniw, czyli o jakiej wartości mowa? Nie podaje też żadnego źródła tej informacji.

20) Podrozdz. 6.1.2., str. 38 (zdanie kolejne)

„Praktycznie, metody pasywne są opłacalnymi rozwiązaniami dla niskonapięciowych akumulatorów kwasowo-ołowiowych i bazujących tylko na związkach niklu”.

Praktycznie czy w praktyce? Należało podać źródło takiej informacji.

21) Podrozdz. 6.1.3., str. 40 (Pierwsze zdanie)

„Główną wadą tej metody jest to, że nadmiar energii z ogniw o wyższych napięciu jest rozpraszany w postaci ciepła, co skutkuje krótszym czasem pracy akumulatora zwłaszcza podczas rozładowywania”

Powinno być „(...) o wyższych napięciach (...)”.

22) Podrozdz. 6.1.3.5., str. 47 (siódmy wiersz)

„W ten sposób energia z najbardziej naładowanego ogniwa może być przenoszona do najmniej ogniwa lub do całej baterii lub/i z baterii do najsłabszego ogniwa”

W zdaniu być może zabrakło słowa *naładowanego*, czyli prawdopodobnie miało być „(...) do najmniej *naładowanego* ogniwa (...)”. Bez tego uzupełnienia zdanie pozbawione jest sensu.

- 23) Rozdział 8., str. 52, (trzecie zdanie)
„W celu spełnienia warunków iskrobezpieczności ogniw (wraz z systemem zarządzania baterią - BMS) muszą być one odizolowane od wpływu otoczenia, a więc umieszczone w specjalnych obudowach ognioodpornych.”
Co Dyplomant rozumie pod pojęciem „iskrobezpieczności” w odniesieniu do ogniw o pojemnościach 10 Ah lub 120 Ah? Co to jest „specjalna obudowa ognioodporna”? Sądzę, że chodziło Autorowi o budowę przeciwwybuchową z osłoną ognioszczelną.
- 24) Rozdział 8., str. 52, (pierwsze zdanie drugiego akapitu)
„Celem przeprowadzonych przez autora badań było sprawdzenie przede wszystkim poziomu zagrożenia, zwłaszcza od wysokiej temperatury, dla wybranych ogniw litowo-żelazowo-fosforanowych eksploatowanych zgodnie z zaleceniami producenta, ale użytkowanych w uciążliwych warunkach górniczych”.
W sformułowanym celu badań Autor zakłada sprawdzenie *poziomu zagrożenia*. Pojęcie poziomu zagrożenia pojawia się tylko raz w rozprawie doktorskiej, właśnie w rozdziale 8. Nigdzie nie przytoczono definicji *poziomu zagrożenia*, ani jaka jest skala czy miara tych poziomów. Co Autor pod tym pojęciem rozumie? Wydaje się, że chodzi po prostu o sprawdzenie nagrzewania się poszczególnych ogniw i akumulatora.
- 25) Rozdział 8., str. 52, (drugie zdanie drugiego akapitu)
„Dotyczy to zwłaszcza, wydawało by się, nieistotnych zagrożeń w przypadku przypadkowych, cyklicznych, niewielkich przeciążeń i rozładowań ogniw”.
W zdaniu występuje powtórzenie *w przypadku przypadkowych* oraz błąd ortograficzny (powinno być *wydawałoby się*).
- 26) Rozdział 8 ma nielogiczny układ. Oto bowiem po głównym tytule na stronie 52 jest tekst wprowadzenia oraz ponad dwustronicowy opis czterech etapów badań (bez numerowanych podrozdziałów). Następnie występuje pięć, wyróżnianych nienumerowanymi tytułami, opisów systemów BMS pasywnego i aktywnego z algorytmem balansowania ogniw. Sumarycznie zajmuje to blisko dziesięć stron. Dopiero na stronie 60 jest numerowany podrozdział 8.1. Tu występuje kolejna nieścisłość. Otóż tytuł podrozdziału

brzmi „Badania wpływu prądu rozładowania na rozkład temperatury i bezpieczeństwo pracy ogniwa litowego”, a znajdujemy w nim również opis parametrów technicznych ogniwa i czujnika temperatury. Uważam, że powinien znaleźć się w pracy podrozdział zawierający opis stanowisk i warunków badań. Zwiększyłyby to przejrzystość pracy. Dalej na stronie 63 w podrozdziale 8.1 pojawiają się kolejne etapy badań od pierwszego do czwartego. Powstaje coś w rodzaju podetapów, co czyni pracę trudną do przyswojenia i oceny.

Numeracja rysunków w tym rozdziale jest nieprawidłowa. Od strony 55 do strony 71 jest numeracja od 8.1 do 8.21. Na stronie kolejnej widnieje ponownie rysunek numerowany jako 8.21. Następnie od strony 73 do 82 numeracja rysunków układa się w porządku od 8.22 do 8.32, ale kolejny rysunek na stronie 84 ma już przyporządkowany numer 8.49. Brakuje w numeracji 11 rysunków. Takie uchybienie prawdopodobnie zostałyby wykryte, gdyby Autor sporządził spis rysunków. Niestety takiego w pracy nie ma.

Dalsze nieścisłości, niejasności oraz uchybienia formalne dotyczące rozdziału ósmego podano w kolejnych punktach.

27) Rozdział 8., str. 55 (pierwszy wiersz)

Wyróżniony akapit *Zakres badań* zawiera dwuzdaniową informację o zastosowanych w badaniach układach BMS. Nie stanowi on opisu zakresu badań. Ten został znacząco rozproszony w bieżącym rozdziale.

28) Rozdział 8., str. 55

Rysunek 8.1 zatytułowany *Bocznikowanie rezystorowe* był prezentowany już jako rysunek 6.5. Jaki jest sens wprowadzania go ponownie? Wystarczyło powołać się na rysunek 6.5, rozumiejąc, że Doktorant mógł nie posiadać schematu systemu BMS ORION, który (jak podano na tej stronie rozprawy) jest produktem nabytym do przeprowadzenia badań porównawczych.

29) Rozdział 8.

W badaniach przeprowadzonych w etapie II wykorzystywany jest akumulator z 8 ogniwami. Pokazują to fotografie i schematy jako rysunki 8.3, 8.4, 8.6 umieszczone odpowiednio na stronach od 56 do 58. Informacje o trzech akumulatorach złożonych z ośmiu ogniw pojawia się dopiero w podrozdziale 8.2 na stronie 72.

Z czego wynikało przyjęcie takiej liczby ogniw, skoro akumulator przeznaczony do zasilania napędu elektrycznego ciągnika podwieszanego składa się z piętnastu?

30) Rozdział 8., str. 56, (rysunek 8.2)

Na rysunku tym napięcie elektryczne oznaczono jako V, a nie U. Czy jest to rysunek autorski czy zaczerpnięty z literatury?

31) Rozdział 8., str. 57, (rysunek 8.4)

Na rysunku tym przedstawiono schemat ideowy systemu BMS. Pokazano tam czujnik prądu i bezpiecznik. Jaki zastosowano czujnik prądu i zabezpieczenie nadprądowe w tym układzie i czym się kierowano przy ich doborze?

32) Rozdział 8., str. 58 (ósmą wiersz od dołu strony)

Napisano: „System BMS baterii składa się z:

- modułu pomiarowego i sterującego (rys. 8.5) – układ sterujący, służy do pomiaru napięć podłączonych ogniw, sterowania pracą całego systemu BMS oraz nadzoru parametrów pracy baterii, (...)”

W jakim celu wymienia się moduł pomiarowy, skoro dalej czytamy, że pomiary wykonuje układ sterowania?

Powinno raczej być: „(...) modułu pomiarowego i sterującego (rys. 8.5), służących do pomiaru napięć podłączonych ogniw oraz sterowania pracą całego systemu BMS oraz nadzoru parametrów pracy baterii, (...)”.

33) Rozdział 8., str. 58 oraz str. 65

Rysunki 8.5 i 8.6, a także 8.13 i 8.14 zawierają czarne obramowanie. Pozostałe rysunki nie posiadają takiego obramowania. W mojej opinii w całej pracy formatowanie rysunków powinno być ujednolicone.

34) Podrozdział 8.1, Str. 63, (rysunek 8.10)

Na rysunku 8.10 przedstawiono rozmieszczenie czujników temperatury od T_1 do T_5 na obudowie ogniwa. Czym kierowano się stosując taki ich rozkład? Jaki rodzaj czujnika temperatury zastosowano i jakie jest uzasadnienie jego wyboru?

Na stronie 65. w wyróżnionym akapicie zatytułowanym *Wyniki badań* Autor podaje, że uzyskane rezultaty wskazują na T_1 jako punkt, w którym ogniwo nagrzewa się najbardziej. Z czego to wynika? Czy nie jest to czasem efekt słabego kontaktu elektrody ogniwa z elektrodą doprowadzonego przewodu i zbyt duża rezystancja przejścia (styku) w tym miejscu powoduje

nadmierne nagrzewanie się tego punktu? Czy badano rozkład temperatury obudowy ogniwa z wykorzystaniem innych środków np. kamery termowizyjnej w celu określenia właściwego rozmieszczenia czujników? Czy podobny schemat badań przyjęto przy ocenie nagrzewania się akumulatora w układzie z balansowaniem?

- 35) Podrozdział 8.1, str. 63, (rysunek 8.11)

Rysunek 8.11 przedstawiać ma stanowisko (raczej widok stanowiska) do badania rozkładu temperatury na obudowie ogniwa litowego. Tymczasem zdjęcie zamieszczone w egzemplarzu rozprawy doktorskiej jako rysunek 8.11 jest nieostre. Brak jakichkolwiek oznaczeń i opisu elementów tego stanowiska. W takiej postaci jest ono pozbawione sensu.

- 36) Podrozdział 8.1, str. 65

W etapie trzecim i czwartym Autor podaje warunki przeprowadzenia badań rozładowania poniżej wartości minimalnej napięcia. Przy czym przyjął prąd obciążeniu ogniwami 2,5 A i 3,8 A. Natomiast na stronie 71 podane są wyniki w postaci przebiegów wielkości elektrycznych i temperatury wyłącznie dla wartości prądu 3,8 A (rysunek 8.21). Brakujących rezultatów nie znajdzie się również w załącznikach.

- 37) Podrozdział 8.1, str. 65/66 (drugi wiersz od dołu strony)

„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 przegrzać [42]”.

Posłużono się potocznym językiem, raczej powinno być sformułowanie „przekroczyć temperaturę dopuszczalną”. Ponadto tytuł podrozdziału dotyczy wpływu prądu rozładowania na rozkład temperatury (...), a eksperyment dotyczy ładowania ogniwa i na stronie 67 zamieszczono przebiegi prądu, napięcia na zaciskach ogniwa oraz temperatury tego procesu (wszystkie w jednostkach względnych).

Takie niezgodności zawartości merytorycznej z tytułem rozdziału lub podrozdziału w sposób skuteczny utrudniają ocenę pracy.

- 38) Podrozdział 8.1, str. 66 (siódmy wiersz)

„Ze względu na występująca termiczną stałą czasową ogniwa, przez pewien czas po wyłączeniu ładowania temperatura wzrasta.”

Powinno być „(...) występującą (...)”.

- 39) Podrozdział 8.1, str. 66 (trzeci wiersz od dołu strony)

„Aby zweryfikować wpływ obciążenia, przeprowadzono odpowiednie badania dla różnych stałych wartości prądów obciążenia w temperaturze pokojowej (około 20°C) przy zapewnieniu swobodnego chłodzenia. (rys.8.18)”

Powinno być jasno napisane wpływ jakiej wielkości na jaką wielkość – w tym przypadku obciążenia (prądu obciążenia) na przyrost temperatury lub temperatury nagrzewania się ogniwa w punkcie T_1 . Wynika to co prawda ze wskazanego (za kropką kończącą zdanie) powołania na rysunek, jednak od Autora wymaga się, aby tekst rozprawy w każdym jej rozdziale był jasny i zbieżny z ilustracjami oraz wykresami, a jednocześnie nie wzbudzał wątpliwości co do jego znaczenia.

- 40) Podrozdział 8.1, str. 67 (czwarty wiersz od dołu strony)

„Podczas ładowania prąd był praktycznie stały w czasie (niezależnie od ustawionych wartości) i zaczął spadać, gdy napięcie spadło do wartości bliskiej minimum ($U_{\min} = 2,5 \text{ V}$)”.

W zdaniu jest powtórzenie „spadać” i „spadło”. Raczej powinno się użyć sformułowania *obniżyć, zmniejszać swoją wartość*.

- 41) Podrozdział 8.1, str. 68 (rysunek 8.18)

„Rys. 8.18. Wzrost temperatury ogniwa T , (czujnik T_1) podczas rozładowania (do minimalnej wartości napięcia U_{\min} równej 2,5 V) dla różnych prądów obciążenia w warunkach swobodnej wymiany ciepła do otoczenia. ($T_0 = 22^\circ\text{C}$)”.

Powinno być raczej: „(...) Przebiegi temperatury ogniwa w punkcie T_1 odniesiony do temperatury otoczenia podczas (...)”.

Prezentowane przebiegi temperatury pokazują, że punkt ten nie osiąga stanu równowagi cieplnej. Czy wyznaczono lub zidentyfikowano zastępcze cieplne stałe czasowe lub model cieplny poszczególnych ogniw (ogniwa)? Byłaby to cenna informacja pod względem przebiegu nagrzewania i chłodzenia całego akumulatora, a teźże nie zawarto w pracy.

- 42) Podrozdział 8.1, str. 69 (trzecie zdanie)

„Stwierdzono jednak, że czas do dopuszczalnego maksymalnego rozładowania (minimalna wartość napięcia ogniwa) jest liniowo zależny od wartości prądu, co można porównać z rys 8.19”.

Doktorant nie przedstawił takiej zależności w formie wykresu, który by potwierdził ten wniosek. Czytelnik musi sam z rysunku 8.19 odczytać czasy rozładowania ogniwa do minimalnej wartości napięcia, co jest dość trudne zważywszy na przyjętą jednostkę czasu na osi odciętych, a przede wszystkim brak pionowych linii siatki, prostopadłych to tejże osi.

43) Podrozdział 8.1, str. 70 (rysunek 8.20)

Podpis pod rysunkiem brzmi: „Rys. 8.20. Czas trwania spadku napięcia do wartości minimalnej (2,5V) w zależności od temperatury otoczenia (5-60°C) przy obciążeniu prądem stałym równym 3,8A”.

Na rysunku natomiast przedstawiono przebiegi napięcia ogniwa odniesione do wartości minimalnej dla różnych temperatur otoczenia przy stałym prądzie obciążenia. Oczywiście z wykresów tych wynikają czasy rozładowania ogniwa, ale rysunek bezpośrednio nie przedstawia zależności funkcyjnej tej wielkości od temperatury otoczenia. Ponadto spadek napięcia w elektrotechnice i kopalnianych sieciach elektroenergetycznych jest precyzyjnie zdefiniowany.

44) Podrozdział 8.1, str. 71 (jedenasty wiersz od dołu strony)

„Jednak po osiągnięciu minimalnej wartości napięcia U_{\min} nie przekracza ona +30°C”.

Tymczasem w podpisie pod rysunkiem 8.21 napisano, że T_d wynosi +33°C.

45) Podrozdział 8.2, str. 72 (rysunek 8.21 – powtórzony numer rysunku)

Podpis pod rysunkiem ma brzmienie: „Rys. 8.21. Stanowisko do pomiaru i zapisu danych”.

Z podpisu nie wynika do pomiaru jakich wielkości jest to stanowisko ani zapisu jakich danych. Co prawda Doktorant w tekście tego podrozdziału wyjaśnia to, co nie zwalnia go ze sporządzenia jasnego podpisu pod rysunkiem wprowadzonym do pracy.

46) Podrozdział 8.2, str. 74 (jedenasty wiersz od dołu strony)

„Ze względu na różnicę działania badanych systemów BMS, widoczne są różnice przebiegów otrzymanych charakterystyk. Wynika to z różnicy sposobów pomiaru i zapisu danych w systemie pomiarowym”.

W dwóch krótkich zdaniach powtórzono trzy razy słowo *różnica* i jego odmiany.

47) Podrozdział 8.2, str. 74 (dziewiąty wiersz od dołu strony)

„W badanych systemach BMS pomiar i zapis napięcia ogniw akumulatorowych był wykonywany wówczas, gdy systemy BMS miały wyłączoną funkcję balansowanie ogniw. Natomiast system pomiarowy nadal realizował pomiar i zapis napięć na zaciskach ogniw w czasie co 100 ms, niezależnie od trybu pracy systemów BMS. Uwidacznia się to brakiem synchronizacji pomiarów. Z tego więc powodu akwizycja części wyników pomiarów była realizowana przy wyłączonym balansowaniu a część przy włączonym. W efekcie tego otrzymane przebiegi niektórych charakterystyk nie stanowią jednolitych linii, co w niczym nie podważa ważności wykonanych pomiarów”.

Opis ten jest niezrozumiały. Czy w sposób cykliczny (co okres próbkowania) rejestrowane były napięcia od U_1 do U_8 , a U_{bat} w chwilach braku aktywności BMS? Co oznacza sformułowanie: *zapis napięcia*?

Wreszcie na tej stronie, czyli dopiero na 74., Autor podał wartość okresu próbkowania, który jest równy 0,1 s. Czym kierowano się przy doborze tej wartości?

48) Podrozdział 8.2, str. 79

Szczególnie w przebiegu napięcia przy balansowaniu aktywnym bateria – ogniwo (BMS-A1) występują znaczne oscylacje, pokazują to rysunki 8.29, 8.30, 8.31, 8.51, 8.52, 9.7, 9.9, 9.11, a także 10.10, 10.11 i 10.12. Podobnie wyglądające przebiegi znajdziemy w załącznikach. Autor nie wyjaśnił ich wpływu na ogniwa baterii oraz na przebieg napięcia na zaciskach akumulatora, a więc *de facto* na warunki zasileniowe napędu elektrycznego maszyny górniczej.

49) Podrozdział 8.2, str. 81 (siódmy wiersz od dołu strony)

„Z przeprowadzonych badań wynika, że zastosowanie dowolnego z dwóch opracowanych przez autora 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 BMS lub z pasywnym BMS.”

Jest to częściowo prawda, gdyż w sytuacji pojedynczego obciążonego ogniwa zastosowanie BMS z balansowaniem metodą ogniwo do baterii skraca czas rozładowania w stosunku do baterii bez systemu BMS. Pokazują

to rys. 8.26 oraz 8.29, a także rys. I.3. Dla tego systemu efekt wydłużenia pojawia się w sytuacji co najmniej dwóch obciążonych ogniw akumulatora.

- 50) Podrozdział 8.3, str. 83 (pierwsze zdanie tego podrozdziału)
„Badania przeprowadzono dla akumulatorów (składających się z ośmiu ogniw litowych LiFeP04, 10 Ah, typu Headway LFP38120 (S) [28]) pracujących w różnych wartościach temperaturach zarówno pokojowej (ok. +20°C, wilgotność ok. 40%), jak i podwyższonej (do około +60°C)”.
Powinno być: „(...) w różnych wartościach temperatury (...)”.
- 51) Podrozdział 8.3, str. 83 (następne zdanie)
Autor powołuje się na rysunek 8.48, a w pracy nie znajdziemy ilustracji o tym numerze (uwaga 23).
- 52) Podrozdział 8.3, str. 84 (trzeci wiersz od dołu strony)
„Widoczne na rys. 8.51-8.53 różnice w przebiegu napięć wynikają jedynie ze sposobu pomiaru i rejestracji danych”.
Rysunek 8.53 nie przedstawia przebiegu napięć.
- 53) Podrozdział 8.3, str. 88 (Rysunek 8.53)
„Rys. 8.53 Zmiana czasu t_2 obniżenia się napięcia ogniwa do wartości minimalnej ($U_{\min} = 2,5 \text{ V}$) z temperaturą otoczenia T przy zastosowaniu aktywnego BMS (metoda BMS-A1-bateria do ogniwa, BMS-A2-ogniwa do baterii); t_{20} - czas odniesienia dla 20°C wynosi $t_{20} = 114 \text{ min}$ dla BMS-A1)”.
Rysunek przedstawia zależność czasu (a ściślej mówiąc jego wartości odniesionej określonej do temperatury +20°C) osiągnięcia minimalnej wartości napięcia od temperatury otoczenia w sytuacji zastosowaniu aktywnego BMS.
- 54) Rozdział 10, str. 100 (rysunek 10.3)
Rysunek ten przedstawia fotografię akumulatora przeznaczonego do zasilania napędu elektrycznego ciągnika PCA-1 z zaznaczonymi punktami pomiaru temperatury od T_{PCA1} do T_{PCA8} . Niestety w wydruku trudno jest dostrzec punkty umieszczenia niektórych z czujników temperatury.
- 55) Rozdział 10, str. 104 (czternasty wiersz)
„Na wykresach rys. 10.6 i 10.11 przedstawiono dla przykładu zmiany temperatury akumulatora w czasie, podczas rozładowywania akumulatora w różnych punktach pomiarowych ($T_{pca1} \dots T_{pca8}$) podczas obciążenia prądem 53A (około 45% wartości standardowego rozładowania), bez podłączonego i z podłączonym aktywnym systemem BMS”

Na rysunku 10.6 jest schemat blokowy układu do badania współpracy BMS z akumulatorem, a rys. 10.11 przedstawia przebiegi napięć oraz prądu obciążenia (w jednostkach względnych). Rysunki z przebiegami temperatury odniesionej do T_0 (a nie zmianami w czasie) znajdują się pod numerami 10.8 i 10.13. Ponadto miejsca zainstalowania czujników temperatury oznaczono na rysunku symbolami T_{PCA1} do T_{PCA8} , czyli pisząc w indeksach wielkie litery, natomiast w cytowanym zdaniu są one pisane małymi literami.

Ponadto zdanie to jest niepoprawnie zredagowane. Wynika z niego, że rozładowanie akumulatora następuje w punktach pomiarowych ($T_{pca1} \dots T_{pca8}$), a przecież są to miejsca pomiaru temperatury.

56) Rozdział 10, str. 109 (jedenasty wiersz od dołu strony)

„Widoczne na wykresach skokowe zmiany wartości pomierzonej temperatury wynikają z rozdzielczości zastosowanego przetwornika analogowo-cyfrowego”.

Trzeba stwierdzić, że część przebiegów temperatury budzi z tego powodu wątpliwości. Rozwiązanie problemu zdefiniowanego w tym zdaniu jest proste, należało zmienić lub zmodernizować układ pomiarowo-rejestrujący.

57) Podrozdział 10.1, str. 109 (piąty wiersz od dołu strony)

„Z przeprowadzonych przez autora badań wynika, że dobre efekty uzyskuje się gdy prąd balansowania jest równy około 20% ich pojemności”.

Wyników takich badań nie ma w ocenianej rozprawie, więc podawanie takiego wniosku jest nieuprawnione. Jeżeli Autor wyniki takie już opublikował w jakimś periodyku to należało podać źródło.

58) Na stronie 119 Autor zamieścił *Wykaz najczęściej stosowanych oznaczeń i skrótów*, jako numerowaną część pracy (13). Jest tam wymienionych siedemnaście symboli, przy czym standardowy prąd rozładowania oznaczono jako I_{spr} . Może dziwić, że w całej pracy symbol ten został użyty bodaj tylko raz na rysunku 8.16 (str. 67) i to jako wielkość odniesienia. Sama liczba zestawionych symboli może również budzić niepokój, gdyż w podpisach pod rysunkami Autor podał np. czasy od t_1 do nawet t_{12} , zwykle jako czasy załączania i wyłączania obciążenia i balansowania ogniwa (baterii). Jednym z najczęściej stosowanych wielkości jest czas t_2 , który nie został w tym spisie wymieniony. Niestety czasem oznacza on *moment* wyłączenia obciążenia ogniwa/akumulatora (np. rys. 8.8, 8.26), czas

wyłączenia ładowarki (rys. 8.16), czas trwania pracy baterii akumulatora (str. 82), czas wyłączenia obciążenia bez systemu BMS (str. 82), czas zanikania napięcia (str. 82), czas obniżenia się napięcia ogniwa do wartości minimalnej (rys. 8.53), a nawet (rys. 8.21, str. 71) temperaturę T_d (33°C) przy minimalnej wartości napięcia zarejestrowanej w t_3 (choć w tym przypadku chodzi o czas, w którym osiągnięto wartość minimalną napięcia). Zauważyć można, że nawet w ramach jednej strony tekstu (str. 82) t_2 miało trzy określenia.

Symbol ten również używany jest w rozdziale 11 zatytułowanym *Wnioski szczegółowe*, tym razem pod nazwą czasu rozładowania napięcia akumulatora - swoją drogą należy zapytać Autora co rozumie pod tym pojęciem.

To wyraźnie pokazuje, że gdyby spis oznaczeń i symboli został sporządzony należycie Autor ustrzegłby się takiego nieładu, a symbole i oznaczenia stosowane w pracy miałyby jednoznacznie przypisane wielkości. W mojej ocenie stanowi to istotne uchybienie rozprawy.

- 59) Rysunki 8.22, 8.23-8.25, 8.49 (błędna numeracja), 9.4, 10.6 są schematami z opisem elementów w języku angielskim. Dodatkowo rysunki 8.23-8.25 w wydruku są bardzo słabo czytelne. Praca jest w języku polskim i w mojej opinii wszystkie jej składowe powinny być opisane w tym języku, a rysunki powinny być tak sporządzone, by ich czytelność nie podlegała dyskusji.
- 60) Podpisy pod rysunkami nie są w żaden sposób wyróżnione. Są pisane tą samą czcionką o tym samym rozmiarze co tekst lity pracy, nierzadko zajmując ponad 6 linii. To znacznie utrudnia czytanie samej rozprawy. Rysunki 8.8, 8.15, 8.16-8.21, 8.26-8.31, 8.51-8.52, 9.4-9.12, 10.7-10.13 oraz rysunki z załączników przedstawiają zwykle przebiegi danych wielkości elektrycznych i/lub temperatury (w jednostkach względnych). Natomiast Autor raz podpisuje je, jako np. „Zmiany temperatury...”, „Wzrost temperatury...”, „Czas trwania spadku...”, „Napięcie oraz przebiegi temperatury...”, „Zmienność napięcia...”, „Zmiany napięcia...”, „Wykresy zmian...”, „Zmiana wartości napięcia...”. To znacznie utrudnia ocenę zawartości merytorycznej pracy odnoszonej do tych ilustracji.
- 61) Uważam za znaczny niedostatek pracy sposób prezentacji wyników badań. Autor ograniczył ją wyłącznie do formy graficznej w postaci różnych przebiegów czy zależności funkcyjnych. Natomiast wiele wielkości istotnych

z punktu widzenia postawionego celu i tezy rozprawy można byłoby zaprezentować w formie tabelarycznej. W szczególności czas t_2 czy przyrost temperatury (temperaturę) ogniwa. Umożliwiłoby to ocenę uzyskanych wyników, a być może przyczyniłoby się do sporządzenia innych zależności w formie graficznej i wyciągnięcie dodatkowych cennych wniosków, istotnych z punktu widzenia postawionej tezy i celu rozprawy.

- 62) Doktorant podaje w rozprawie, że do badań wykorzystano dwa opracowane przez niego systemy BMS to jednak trudno ocenić ich oryginalność i nowatorstwo w sytuacji, gdy w pracy nie zostały zamieszczone żadne schematy ani opis tych urządzeń, a jedynie kilka fotografii. Należy żałować, że Autor nie przedstawił tych rozwiązań systemów BMS, bo mogłoby to znacząco podnieść wartość pracy.
- 63) Niezrozumiałe wydaje się również to, że Autor nie pokusił się o sprawdzenie działania tego systemu BMS w sytuacji zasilania silnika indukcyjnego, z akumulatora (nawet tego wykonanego w skali) z wykorzystaniem falownika, przy obciążaniu tej maszyny elektrycznej stałym i zmiennym momentem oporowym. Być może takie badania były robione, ale w pracy wyników takich eksperymentów brak.
- 64) Szkoda, że Autor nie zastosował się do elementarnych zasad, dotyczących sposobu pisania prac naukowych, znacząco ułatwiłoby to czytanie pracy i końcowy efekt wizerunkowy całości byłby znacząco lepszy. Ta gorzka uwaga nie podważa wniosków podanych w punkcie 4. niniejszej recenzji.

4. Wnioski końcowe

Pomimo uwag zawartych w punkcie drugim i trzecim niniejszej recenzji w mojej opinii teza rozprawy oraz cel naukowy pracy zostały osiągnięte przez Autora. W rozprawie przedstawiono analizę teoretyczną problemu oraz wyniki przeprowadzonych badań empirycznych, a także opracowano wnioski końcowe.

Zastosowana metodyka badawcza, wnioski uzyskane na podstawie analiz wyników przeprowadzonych eksperymentów oraz doświadczenia praktyczne, wynikające z opracowania i zastosowania systemu BMS do aktywnego balansowania metodą bateria do ogniwa, w odniesieniu do maszyny górniczej z napędem elektrycznym mogą być również wykorzystane w innych rozwiązaniach z omawianego zakresu

1) Stwierdzam, że rozprawa stanowi samodzielne i oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego w głównej mierze zagadnień eksperymentalnych związanych z użyciem maszyny transportowej o napędzie elektrycznym zasilanym z baterii ogniw litowych, użytkowanej w podziemnych wyrobiskach górniczych.

2) Autor wykazał się ogólną wiedzą oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w dyscyplinie *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*.

W odniesieniu do *Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późn. zm.)* stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Wojciecha Kurpiela spełnia wymagania tej ustawy i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

