

## **Recenzja**

### **rozprawy doktorskiej mgra inż. Bartosza Polnika pt.:**

### **„Badanie i analiza układu zasilająco-sterującego górniczej lokomotywy akumulatorowej”**

#### **Podstawa opracowania recenzji**

Niniejszą recenzję opracowano na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej z dnia 01.12.2016 r., na podstawie przekazanego egzemplarza rozprawy doktorskiej, która liczy 129 stron.

#### **1. Ocena tematu i zakresu rozprawy**

Autor podjął w pracy ciekawą problematykę rekuperacji energii elektrycznej w trakcie użytkowania lokomotywy akumulatorowej w podziemiach kopalni. Jest to zagadnienie bardzo istotne ze względu na możliwość zwiększenia dyspozycyjności lokomotyw i konieczność redukcji ryzyka związanego z zagrożeniem wystąpienia wybuchu mieszaniny powietrza i wodoru, wydzielającego się podczas procesu doładowywania baterii ogniów.

Lokomotywy akumulatorowe stosowane są w kopalniach podziemnych do transportu materiałów pomocniczych, w rejonach szybów transportowych i w wyrobiskach korytarzowych, w których nie można prowadzić trakcji elektrycznej, co może wynikać zarówno z występowania IV kategorii zagrożenia metanowego, jak i wymiarów wyrobiska. Poza tym są one stosowane w procesie transportu maszyn pomiędzy rejonami, przy przezbieraniu ścian.

Cechą charakterystyczną wszystkich wyżej wymienionych przypadków użytkowania tych lokomotyw są krótkie drogi transportu i związane z tym: częsty rozruch silnika elektrycznego oraz stany nieustalone związane z ruszaniem i hamowaniem. Tego rodzaju charakter pracy powoduje duży pobór energii z akumulatorów i szybkie ich rozładowywanie. W związku z powyższym rekuperacja energii elektrycznej w trakcie hamowania lokomotywy pozwoli na wydłużenie czasu pomiędzy kolejnymi ładowaniami akumulatorów, co znacznie zwiększy dyspozycyjność lokomotyw.

Jest to zagadnienie złożone, gdyż oprócz konieczności opracowania i przebadania nowego rozwiązania technicznego układu zasilająco-sterującego niezbędne jest uwzględnienie problematyki bezpieczeństwa i ochrony zdrowia związanej z zagrożeniem wybuchu wodoru, wydzielanego w trakcie procesu rekuperacji energii. O wadze tej problematyki świadczy fakt umieszczenia lokomotyw elektrycznych, jako jednej z dwu maszyn stosowanych w podziemiach kopalń, w Załączniku nr 5 do Dyrektywy 2006/42/WE.

Załącznik ten zawiera listę maszyn, w stosunku do których opracowano procedury oceny zgodności z zasadniczymi wymaganiami dotyczącymi bezpieczeństwa i ochrony zdrowia. W przypadku nieuwzględnienia przez producenta wymagań zawartych w normie zharmonizowanej dotyczącej tej grupy maszyn ocenę zgodności na etapie projektowania powinna przeprowadzić jednostka notyfikowana.

Podjęcie zatem przez Autora problematyki dotyczącej:

- opracowania założeń i koncepcji innowacyjnego układu zasilająco-sterującego lokomotywy umożliwiającego efektywną i bezpieczną rekuperację energii;
- przeprowadzenia badań stanowiskowych wersji pilotowej tego układu umożliwiających odwzorowanie charakteru pracy silnika w warunkach eksploatacyjnych;
- ustalenia rozprzestrzeniania się wodoru w skrzyni akumulatorowej na podstawie symulacji komputerowej tego procesu;
- przeprowadzenia badań intensywności wydzielania się metanu z uwzględnieniem charakterystyki prądu ładowania;

należy uznać za trafne i w pełni uzasadnione, zarówno z punktu widzenia poznawczego, jak i ze względów użytkowych.

## **2. Ocena merytoryczna rozprawy i osiągniętych celów poznawczych**

Rozprawa doktorska mgr inż. Bartosza Polnika stanowi syntetyczne opracowanie wyników prowadzonych przez Niego badań w zakresie sprawności układów napędowych i bezpieczeństwa użytkowania, w aspekcie rekuperacji energii części elektrycznej zespołów napędowych lokomotyw akumulatorowych. Zawiera ona wyniki badań polowych oraz stanowiskowych, przeprowadzonych zgodnie z przyjętą przez Autora procedurą badawczą. Rozprawa składa się z 8 rozdziałów, wprowadzenia, wniosków szczegółowych, podsumowania i spisu literatury. Spis literatury zawiera 92 pozycje, w tym 18 zagranicznych, 9 autorskich lub współautorskich Bartosza Polnika. Dobór materiałów źródłowych jest prawidłowy, z wyjątkiem pozycji dwu pozycji z lat 70. i dwu z lat 80. ubiegłego wieku. Poza tym materiał źródłowy pod nr 92 nie powinien być zamieszczona jako pozycja literaturowa.

Układ pracy jest logiczny i przejrzysty. W trzech pierwszych rozdziałach Autor uzasadnił celowość podjęcia tematu, przedstawił stan wiedzy w zakresie zespołów napędowych lokomotyw elektrycznych, wyniki badań wstępnych oraz zawarł tezę, cele: poznawczy i użytkowy oraz zakres pracy. Po analizie stanu wiedzy dotyczącej podjętej problematyki Autor przedstawił koncepcję części elektrycznej układu napędowego, a następnie badania stanowiskowe wersji doświadczalnej tego układu w aspekcie możliwości i efektywności rekuperacji energii elektrycznej. W dalszej kolejności zajął się aspektem bezpieczeństwa związanego z wydzielaniem się wodoru w trakcie doładowywania baterii ogni. Po stwierdzeniu, w wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych, że stężenie wodoru w skrzyni akumulatorowej może przekroczyć poziom dopuszczalny opracował koncepcję układu sterowania, którego celem jest eliminacja zagrożenia wybuchu gazu elektrolicznego.

W rozdziale 1. Omówiono zasadnicze wymagania, zawarte w dwu Dyrektywach 2006/42/WE i 2014/34/UE, które należy uwzględnić przy projektowaniu lokomotyw kopalnianych, dotyczące głównie warunków użytkowania i układu zasilania oraz napędu. Szczegółowe wymagania bezpieczeństwa obejmujące w szczególności lokomotywy zasilane z baterii ogni ołowiowych przedstawiono w oparciu o normę zharmonizowaną PN-EN 60079-7:2010.

Biorąc pod uwagę fakt, że Autor zajmuje się częścią elektryczną układu napędowego i układem sterowania należałoby się odnieść także do Dyrektyw 2006/95/WE oraz 92/31/EWG, 93/68/EWG.

W kolejnym rozdziale przedstawiono rozwiązania techniczne napędów lokomotyw akumulatorowych wraz z charakterystyką techniczną zastosowanych w nich silników elektrycznych, w formie rysu historycznego rozwoju rozwiązań technicznych. Omówiono również stosowane w nich układy sterowania. Praca zyskałaby na przejrzystości, gdyby Autor przedstawił w zakończeniu tego rozdziału w formie syntetycznej zalety i wady dotychczas stosowanych rozwiązań technicznych w aspekcie możliwości rekuperacji energii elektrycznej oraz sprawności napędu.

Rozdział 3, w którym Autor wprowadza pojęcie sprawności jest bardzo istotny w aspekcie interpretacji tezy i omawianych wyników badań przedstawionych w dalszej części pracy. W podrozdziale 3.1 *Wyznaczenie sprawności elektrycznej układu zasilająco-sterującego górniczej lokomotywy akumulatorowej* Autor definiuje sprawność maszyny w odniesieniu do silnika elektrycznego w postaci zależności (3.1) i (3.2). Nie precyzuje przy tym pojęcia *energii oddanej (użytecznej) i pobranej*, a także nie podaje sposobu ich wyznaczenia, co jest istotne w aspekcie przeprowadzonych badań wstępnych lokomotywy Lea BM-12, których wyniki przedstawiono w tym rozdziale. W tabeli 5. zamieszczono wyniki dotyczące „bilansu energii z akumulatora” oraz „sprawności układu napędowego”. Przy wykorzystaniu danych zamieszczonych w tabeli (*energia użyteczna i pobrana* – odpowiednio kolumny 3. i 2.) sprawność wyznaczona z zależności (3.1) wynosi około 12%, podczas gdy podana przez Autora jest równa około 69% (kolumna 4.)

Należy zatem wyjaśnić, którą sprawność wyznaczył Autor na podstawie badań wstępnych i w jaki sposób. Autor używa bowiem w tym rozdziale i w dalszej części pracy pojęcia sprawności w odniesieniu do obiektu technicznego i jego zespołów (maszyny, napędu, silnika elektrycznego, układu zasilająco-sterującego). Można odnieść wrażenie, że nie odróżnia tych pojęć, gdyż stosuje je zamiennie.

Kolejnym pojęciem, które wymaga wyjaśnienia jest „wypadkowa sprawność zespołu napędowego lokomotywy”, której zależność od „mocy pobranej z baterii” przedstawiono na rys. 18. Co prawda Autor nie przeprowadził stosownego testu, ale przy współczynniku dopasowania równym 0,039 i przy tak dużym rozrzucie punktów jest mało prawdopodobne, aby uzyskane równanie regresji było istotne statystycznie. Stąd nieuzasadnione jest stwierdzenie, że sprawność układu zasilająco-sterującego nie przekracza 70%, tym bardziej, że część punktów na rysunku jest usytuowana na poziomie 80%.

Z przeprowadzonej przez Autora analizy wynika, że poprawę sprawności maszyn elektrycznych można uzyskać poprzez zmniejszenie strat. W związku z powyższym dyskusyjne jest stwierdzenie, że „*zdolność do rekuperacji energii stanowi istotny czynnik poprawiający sprawność górniczych lokomotyw akumulatorowych*”. Z zaproponowanego przez Autora zapisu uogólnionej formuły służącej do wyznaczenia sprawności (zależność 3.3) wynika, że rekuperacja energii następuje w tym samym czasie, co jej pobór ze źródła zasilania. Jest to oczywiście niemożliwe, a w dalszej części pracy wykazano przez jaki okres czasu pracy silnik napędza lokomotywę, a przez jaki jest to praca generatorowa silnika napędowego lokomotywy. Poprawnie należałoby zatem mówić o poprawie bilansu energetycznego lub o zwiększeniu dyspozycyjności lokomotywy ze względu na wydłużenie czasu pomiędzy kolejnymi ładowaniami baterii ogniów.

W rozdziale kończącym część wstępną dysertacji potwierdzono możliwość odzysku energii w trakcie użytkowania lokomotywy na podstawie wyników pomiarów stężenia wodoru wewnątrz skrzyni akumulatorowej. Przeprowadzono również analizę charakterystyki prądu elektrycznego uzyskiwanego w trakcie hamowania w przypadku lokomotyw Lea BM-12 i Lea 12 P3A.



Ponadto w podrozdziale 3.3 Autor przeanalizował zmienność prędkości jazdy lokomotywy obciążonej i nieobciążonej na przykładzie trasy transportowej w jednej z kopalń węgla kamiennego. Uzyskany wyidealizowany przebieg został wykorzystany w dalszej części pracy przy opracowaniu programu badań układu napędowego lokomotywy na stanowisku badawczym. W świetle danych zawartych na rys. 31 należy wyjaśnić na jakiej podstawie przyjęto, że w trakcie ciągnięcia składu z ładunkiem silnik rozwijał moment nominalny, a przy jeździe bez ładunku moment ten był równy 30% momentu nominalnego.

Na podstawie przeprowadzonych badań wstępnych Autor wykazał możliwość odzyskania energii elektrycznej w trakcie użytkowania lokomotyw akumulatorowych w podziemiach kopalń. Poza tym w oparciu o analizę stosowanych rozwiązań technicznych tych lokomotyw uzasadnił potrzebę opracowania nowego, innowacyjnego układu napędowego z uwzględnieniem zasadniczych wymagań dotyczących bezpieczeństwa i ochrony zdrowia, zawartych w stosownych dyrektywach nowego podejścia.

Analiza stanu wiedzy oraz przeprowadzone badania wstępne pozwoliły na jasne sformułowanie celów: poznawczego i użytecznego, a także ustalenie zakresu pracy niezbędnego dla udowodnienia postawionej tezy i osiągnięcia celu. Postawiona teza pracy jest słuszna i uzasadniona przy założeniu, że pod pojęciem sprawności układu napędowego rozumie się bilans energetyczny. Biorąc pod uwagę rysującą się tendencję do rezygnacji z przedstawiania tez w pracach habilitacyjnych i doktorskich, uważam, że nie ma potrzeby dalszego rozwijania tego zagadnienia.

W rozdziale 5. Autor przedstawił koncepcję zespołu napędowego składającego się z układu zasilania, przekształtnika energoelektronicznego i silnika elektrycznego. W pierwszej kolejności dokonano wyboru źródła zasilania w postaci ogniów kwasowo-ołowiowych typu 8SPzS, które mogą być stosowane w atmosferze potencjalnie wybuchowej. Przy projektowaniu tego układu, które miało charakter kompilacyjny, przyjęto kryteria bezpieczeństwa i pojemności ogniów.

Przy doborze silnika elektrycznego kierowano się głównie kryterium sprawności. Zdecydowano się na wybór silnika synchronicznego z magnesami trwałymi, który w porównaniu z silnikami asynchronicznymi i prądu stałego, cechuje się większą sprawnością, a ponadto mniejszymi gabarytami przy tym samym momencie obrotowym i możliwością regulacji prędkości obrotowej w szerokim zakresie. Ze względu na brak takiego silnika w wykonaniu przeciwwybuchowym na rynku krajowym i specyficzne napięcie zasilania 88V konieczne było jego zaprojektowanie. Zadania tego podjął się Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych KOMEL, łącznie z wykonaniem egzemplarza doświadczalnego. Zintegrowanie silnika z hamulcem elektromagnetycznym HPSX20 i zastosowanie enkodera umożliwiło eliminację hamulca postojowego. Zgodnie z normą zharmonizowaną PN-EN 1889-2:2003+A1 lokomotywa powinna być wyposażona także w hamulec awaryjny. Załącznik normatywny do tej normy zawiera także program badań dotyczący układów hamulcowych lokomotywy mający na celu ocenę ich funkcjonalności w aspekcie bezpieczeństwa i ochrony zdrowia. W związku z powyższym pomimo zapewnienia przez Autora dysertacji, że wyposażenie elektryczne lokomotywy spełnia wymagania formalne zawarte w trzech przywołanych dyrektywach producent lokomotywy będzie zobowiązany do przeprowadzenia stosownych badań.

Projektowanie układu sterowania miało charakter innowacyjny, w wyniku czego uzyskano nowe rozwiązanie „przekształtnika energoelektronicznego”, który umożliwia uzyskanie prądu do zasilania silnika elektrycznego z wykorzystaniem modulacji PWM. Do regulacji prędkości obrotowej i ustalenia kierunku obrotów silnika wykorzystano sterowanie wektorowe. Układ ten umożliwia także odzyskiwanie energii elektrycznej. W pracy przedstawiono schemat ideowy zaprojektowanego nowego układu sterowania, opisano poszczególne elementy i zasadę działania.

Po przeczytaniu tego rozdziału odczułem pewien niedosyt związany z brakiem informacji związanych z opracowaniem założeń przy doborze silnika. Jednym z istotnych parametrów jest wymagany moment obrotowy rozwijany przez silnik. Do jego wyznaczenia niezbędny jest schemat kinematyczny części mechanicznej układu napędowego i założenie siły uciążu lokomotywy. Zamieszczona w pracy informacja, że układ napędowy lokomotywy będą stanowiły dwa silniki przekazujące moment obrotowy na koła pędne jest niewystarczająca. Wyjaśnienia wymaga także stwierdzenie zawarte w pracy, że dzięki temu rozwiązaniu poprawie ulegnie zdolność lokomotywy do wychodzenia z poślizgu (str. 51). W normie PN-EN 1889-2:2003+A1 wyróżnia się poślizg przy ruszaniu (slipping) i przy hamowaniu lokomotywy (skidding). Bez wątplenia zwiększenie liczby kół pędnych pozwala na uniknięcie poślizgu przy ruszaniu, a przy hamowaniu można uzyskać większą siłę hamowania. Niejasny jest natomiast aspekt wychodzenia z poślizgu.

Badanie wersji doświadczalnej zaprojektowanej części elektrycznej zespołu napędowego lokomotywy (rozdział 6) miało na celu:

- sprawdzenie poprawności przyjętych założeń projektowych,
- potwierdzenie prawidłowego działania w trakcie pracy silnikowej i generatorowej,
- wyznaczenie sprawności,
- przeprowadzenie bilansu energii dla obciążenia odpowiadającego odwzorowanej na stanowisku trasy transportu,
- przeprowadzenie analizy charakteru prądu doładowującego ogniwa w aspekcie występowania wyższych harmonicznych.

Badanie przeprowadzono na stanowisku zlokalizowanym w ITG KOMAG w Gliwicach. Silnik zespołu napędowego lokomotywy sprzężony był mechanicznie z silnikiem prądu stałego o mocy 223 kW. W trakcie pobierania energii z baterii ogniów przez silnik badany silnik prądu stałego pracował w trybie generatorowym, oddając energię do sieci. W trakcie symulacji hamowania lokomotywy silnik prądu stałego napędzał układ napędowy i następowała rekuperacja energii elektrycznej.

Program badań umożliwiał odwzorowanie sześciu cykli pracy lokomotywy, które odzwierciedlały obciążenie zespołu napędowego w trakcie jednej zmiany roboczej. Przez 40% czasu trwania cyklu silnik rozwijał moment nominalny, a przez około 60% był obciążony momentem na poziomie 30% momentu nominalnego. Prędkość obrotową silnika zmieniano zgodnie z odwzorowaną na podstawie rejestracji w warunkach eksploatacyjnych zmiennością prędkości jazdy lokomotywy.

W opisie przebiegu pracy generatorowej silnika badanego układu (hamowanie lokomotywy) podano informację, że moment hamujący był równy 30, 50, 70, 90 i 110 Nm przy prędkości obrotowej 250, 500, 700, 1000, 1250 i 1500  $\text{min}^{-1}$ . Z lakonicznego opisu nie wynika jednak, czy dana wartość momentu obrotowego była powiązana z określoną prędkością obrotową, czy też brano pod uwagę wszystkie możliwe kombinacje. W warunkach rzeczywistych czas hamowania zależy od masy lokomotywy i masy ciągniętego ładunku, momentu hamującego i zakresu osiągniętej zmiany prędkości jazdy. W jaki sposób ustalano zatem wartość momentu hamującego na stanowisku, aby uzyskać zmianę prędkości obrotowej w założonym czasie i w zakresie, wynikającym z odwzorowywanej fazy ruchu lokomotywy?

W tabeli 9. zestawiono wartości średnie sprawności w poszczególnych cyklach badawczych, które zmieniają się w zakresie od 0,716 do 0,724. Można domniemywać, że jest to sprawność części elektrycznej zespołu napędowego, obejmującego układ zasilająco-sterujący i silnik elektryczny, a pod pojęciem „suma energii „oddanej” na wał silnika” Autor rozumie pracę wykonaną przez silnik w trakcie jednego cyklu. Wynika to z danych zawartych w tabeli i opisu układu pomiarowego. Wątpliwości nasuwają się w związku z tym, że zarówno w tytule tabeli 9. i 10., jak i w dalszej części rozdziału Autor używa pojęcia



„sprawność układu zasilająco-sterującego”, a w podpisie rys. 41 występuje pojęcie „wypadkowa sprawność układu zasilająco-sterującego”. Przy czym na str. 61 Autor pisze: „Korzystając z danych z tablicy 10 wyznaczono charakterystykę zależności sprawności układu zasilająco-sterującego od wartości mocy czynnej pobranej z akumulatora – rys.41”. Ponieważ na rys. 41 zaznaczono bardzo dużą liczbę punktów pomiarowych, a w tabeli 10 podano wartości średnie dla 11 poziomów poboru energii powstaje wątpliwość, czy równanie regresji zostało wyznaczone dla wartości średnich, czy z uwzględnieniem wszystkich punktów pomiarowych.

Pewne zastrzeżenia budzi przeprowadzona przez Autora analiza porównawcza, a w szczególności następujące stwierdzenie: „Jak wynika z pomiarów, wypadkowa sprawność nowooprojektowanego układu zasilająco-sterującego jest o ok. 20% wyższa (w nominalnym punkcie pracy) dla silnika napędowego (PMSW) w porównaniu z dotychczas stosowanym rozwiązaniem wykorzystującym silnik szeregowy prądu stałego”. Po pierwsze, co kryje się pod pojęciem nominalnego punktu pracy silnika napędowego. Po drugie, na jakiej podstawie wyznaczono podaną wartość (brak jest odniesienia do fragmentu pracy zawierającego sprawność silnika prądu stałego). Nie można bowiem do tego celu wykorzystać równania regresji przedstawionego na rys. 18 z powodu wcześniej omówionego w recenzji.

Celem kolejnego etapu badań wersji doświadczalnej układu napędowego było pozyskanie danych pozwalających na analizę charakterystyki prądu doładowania z uwzględnieniem występowania wyższych harmonicznych w trakcie rekuperacji energii. Pomiary przeprowadzono przy dwu prędkościach obrotowych (750 i 1500  $\text{min}^{-1}$ ) i przy momencie obrotowym wynoszącym 30, 50, 90 i 110 Nm. Analiza uzyskanych wyników wykazała, że wraz ze wzrostem momentu hamującego rośnie wartość współczynnika odkształcenia prądowego  $\text{THD}_1$  przy obu prędkościach obrotowych. W związku z powyższym Autor podjął dalsze badania mające na celu sprawdzenie, czy występowanie wyższych harmonicznych w prądzie ładowania wpływa na intensywność wydzielania się wodoru w trakcie doładowania ogniów.

Przed przystąpieniem do badań eksperymentalnych dotyczących intensywności wydzielania się wodoru Autor przeprowadził symulację komputerową przy wykorzystaniu programu Autodesk Simulation CFD 2015, której celem było ustalenie rozprzestrzeniania się wydzielanego z ogniów wodoru w skrzyni akumulatorowej (rozdział 7). Na tej podstawie można było ustalić miejsca największego stężenia wodoru w skrzyni, przy założonych warunkach przewietrzania. Ze względu na fakt, że symulację przeprowadzono dla skrzyni wolnostojącej w wyrobisku korytarzowym, przy względnej prędkości lokomotywy i strumienia powietrza, wyniki symulacji można analizować tylko pod względem jakościowym. Prędkość przewietrzania w warunkach rzeczywistych może się bowiem różnić od przyjętej ze względu na fakt, że skrzynia umieszczona jest wewnątrz lokomotywy. Nie zmienia to faktu, że cel symulacji został osiągnięty, gdyż Autor uzyskał istotną informację pozwalającą na ustalenie położenia czujników w skrzyni w trakcie badań eksperymentalnych.

Ich celem było ustalenie wpływu:

- charakterystyki prądu ładowania na zmianę intensywności wydzielania się wodoru (podrozdział 8.2),
- natężenia prądu ładowania, przy stałej wartości ładunku elektrycznego na stężenie wodoru w skrzyni akumulatorowej i różnym stopniu naładowania ogniów (podrozdział 8.3).

Ocenę wpływu charakterystyki prądu na przebieg procesu ładowania przeprowadzono na podstawie pomiarów intensywności wydzielania się wodoru w trakcie ładowania prądem o różnym współczynniku  $\text{THD}_1$  tej samej baterii akumulatorów o pojemności 800 Ah, złożonej z 72 ogniów typu 11PzB 880, stosowanych w lokomotywach Lea BM-12. Badania przeprowadzono w ładowni akumulatorów w kopalni węgla kamiennego, przy użyciu dwu

przekształtników tyrystorowych HMC-PT-02 i BMA-180/150, co pozwoliło na uzyskanie prądu o różnej charakterystyce. Analiza porównawcza wykazała, że ładowanie baterii ogniw prądem o znacznie różniącej się charakterystyce (przebieg czasowy, występowanie wyższych harmonicznych) nie miało wpływu na intensywność wydzielania się gazu elektrolicznego, a tym samym na stężenie wodoru w bezpośrednim otoczeniu badanej baterii.

W trakcie drugiego etapu badań, przeprowadzonych w laboratorium, mierzono stężenie wodoru w skrzyni akumulatorowej w miejscu ustalonym na podstawie symulacji komputerowej. Zgodnie z programem badań baterię w pełni naładowanych ogniw ładowano prądem o natężeniu od 50 do 250A, przy dostarczeniu ładunku elektrycznego 5,4 Ah. Z przedstawionych przebiegów stężenia wodoru wynika, że wraz ze wzrostem natężenia prądu zmniejszał się czas do momentu osiągnięcia dopuszczalnego poziomu stężenia wodoru. Poza tym z przeprowadzonych badań wynika jednoznacznie, że niezależnie od natężenia prądu ładowania, przy w pełni naładowanym akumulatorze, w trakcie rekuperacji może dojść do przekroczenia dopuszczalnego stężenia wodoru w skrzyni akumulatorowej. Podobne próby przeprowadzono przy częściowo rozładowanym akumulatorze. Próba doładowania akumulatora prowadzona do uzyskania dopuszczalnego stężenia wodoru wykazała, że przy natężeniu prądu równym 100 A poziom 50% DGW osiągnięto po czasie 11 minut od rozpoczęcia doładowania. W ciągu kolejnych 2 minut stężenie wodoru wzrosło do 95% DGW. Zatem dopuszczalny poziom stężenia wodoru może zostać osiągnięty także przy doładowaniu baterii częściowo rozładowanej.

Są to bardzo istotne informacje w aspekcie dalszych prac związanych z rekuperacją energii elektrycznej przez zespół napędowy lokomotywy.

Biorąc pod uwagę przedstawione powyżej wyniki badań Autor dysertacji opracował koncepcję systemu sterowania, który zapewni bezpieczną rekuperację energii. Sama idea uzupełnienia wcześniej omówionego układu systemem sterowania procesem rekuperacji jest godna pochwały. Niestety opis koncepcji jest niespójny w świetle prawodawstwa europejskiego dotyczącego bezpieczeństwa i ochrony zdrowia. W części wstępnej rozdziału 9 Autor nazywa ten system *„innowacyjnym systemem monitorowania parametrów bezpieczeństwa pracy baterii ogniw ołowiowych, zintegrowanym z układem zasilająco-sterującym lokomotywy akumulatorowej”*. Dalej Autor wyjaśnia: *„Proponowane rozwiązanie, zgodnie z założeniami, ma realizować funkcję kontrolną i informacyjną, a nie decyzyjno-zarządzającą. Ma bowiem za zadanie wspomagać funkcję operatora lokomotywy akumulatorowej, a nie ograniczać jego możliwości”* (str. 103). Powyższe jednoznacznie stanowi, że z założenia jest tylko system monitorujący, wspomagający pracę operatora.

Opisując budowę i zasadę działania systemu monitorowania (podrozdział 9.2) zawarto stwierdzenie: *„Dodatkowo, jako opcję, przewidziano możliwość podłączenia, poprzez magistralę CAN (...), przełącznika wykonawczego, który będzie albo odłączał baterię akumulatorów od maszyny albo włączał sygnalizację dźwiękową lub świetlną jako ostrzeżenie obsługi”* (str. 104). Z powyższego wynika, że funkcja systemu przestaje być tylko monitorująca, a tym samym mamy do czynienia z bezpieczeństwem funkcjonalnym.

Poprzez integrację omawianego systemu sterowania z układem zasilająco-sterującym lokomotywy może on realizować następujące funkcje (podrozdział 9.3):

- ograniczenie natężenia prądu doładowującego baterię ogniw po przekroczeniu ustalonej wartości stężenia wodoru w skrzyni akumulatorowej,
- wyłączenie zasilania lokomotywy w przypadku przekroczenia stężenia dopuszczalnego,

oraz w II wariantcie:

- aktywacja przewietrzania wnętrza skrzyni akumulatorowej w sytuacji wystąpienia stężenia wodoru większego od dopuszczalnej wartości.



Sama idea sterowania w celu uzyskania stężenia wodoru poniżej wartości dopuszczalnej i zaproponowane działania są bardzo ciekawe, pod warunkiem dokonania pewnej korekty. Autor nie wziął bowiem pod uwagę faktu, że nie można odłączyć napędu od układu zasilania, gdyż zanik napięcia spowoduje zadziałanie hamulca awaryjnego. Może to doprowadzić do sytuacji niebezpiecznej, gdyż hamowanie odbywa się bez udziału operatora. Zamiast tego proponuję wprowadzenie mapy sterowania, w oparciu o którą będzie regulowane natężenie prądu w zależności od stężenia wodoru. Stanowi to bardziej zaawansowany wariant jednej z funkcji zaproponowanej przez Autora.

Ponieważ system sterowania będzie realizował funkcje bezpieczeństwa Dyrektywa 2006/42/WE nakłada na projektanta (producenta) obowiązek sprawdzenia, czy uzyskany poziom nienaruszalności bezpieczeństwa SIL (safty integrity level) systemu sterowania jest większy od wymaganego, ustalonego na podstawie oceny ryzyka. Związane jest to z zapewnieniem niezawodności systemu sterowania poprzez odpowiedni dobór jego architektury, elementów i pokrycia diagnostycznego.

Sądzę, że w związku z powyższymi uwagami Autor podejmie decyzję czy zaproponowany system sterowania będzie realizował tylko funkcję monitorowania i wspomagania operatora, czy też będzie realizował funkcje będące funkcjami bezpieczeństwa, co sprawi, że przedstawione rozwiązanie powinno być dodatkowo sprawdzone w celu oceny spełnienia wymagań bezpieczeństwa. Nie zmienia to jednak mojej opinii, że zaproponowany system jest interesujący i niezbędny dla zapewnienia bezpieczeństwa przy rekuperacji energii elektrycznej przez układ napędowy lokomotywy.

Badania funkcjonalności elementów systemu sterowania, obejmujące pomiar stężenia wodoru i komunikację Bluetooth potwierdziły ich przydatność do celu sterowania układem napędowym lokomotywy akumulatorowej.

Przedstawione wnioski w zdecydowanej większości są sformułowane prawidłowo i wynikają bezpośrednio z przeprowadzonych przez Autora badań. Zostały one podane w nietypowej formie w odniesieniu do treści poszczególnych rozdziałów, co sprawia, że zawierają również streszczenie pracy. W podsumowaniu, zamieszczonym po wnioskach, Autor wykazał zainteresowanie podmiotów gospodarczych i organu nadzoru rynku zaproponowanym w pracy rozwiązaniem technicznym.

Reasumując stwierdzam, że w toku przeprowadzonych badań mgr inż. Bartosz Polnik zrealizował wyznaczone przez siebie cele poznawcze, które stanowią oryginalne osiągnięcia naukowe. Ustalenie możliwości bezpiecznej rekuperacji energii elektrycznej przez układ napędowy lokomotywy akumulatorowej wymagało:

- opracowania procedury badawczej pozwalającej na rozwiązanie problemu naukowego sformułowanego w tytule pracy,
- przeprowadzenia badań polowych i stanowiskowych w celu osiągnięcia założonych celów cząstkowych:
  - analiza bilansu energii dla obciążenia odpowiadającego odwzorowanej na stanowisku trasie transportu,
  - ustalenie charakteru prądu doładowującego ogniwa w aspekcie występowania wyższych harmonicznych;
  - ustalenie rozprzestrzeniania się wodoru w skrzyni akumulatorowej na podstawie symulacji komputerowej tego procesu;
  - identyfikacja intensywności wydzielania się wodoru z uwzględnieniem charakterystyki prądu ładowania;
  - ustalenie wpływu natężenia prądu ładowania, przy stałej wartości ładunku elektrycznego na stężenie wodoru w skrzyni akumulatorowej i różnym stopniu naładowania ogniwa.



Osiągnięcie celu poznawczego byłoby niemożliwe bez opracowania założeń i koncepcji innowacyjnego układu zasilająco-sterującego lokomotywy, umożliwiającego efektywną rekuperację energii wraz z dodatkowym systemem sterowania zapewniającym bezpieczeństwo w trakcie realizacji tego procesu. Zatem cel użyteczny został również osiągnięty.

### 3. Pozostałe uwagi krytyczne i dyskusyjne

Z obowiązku krytycznego oglądu pracy przedstawiam dalsze uwagi, wynikające głównie z niezbyt starannego przygotowania tekstu rozprawy. Brak staranności wyraża się między innymi:

- zbyt skąpym opisem procedury badawczej,
- pominięciem podania zakresu pomiarowego zastosowanej aparatury i dokładności toru pomiarowego,
- zbyt lakonicznej interpretacji części uzyskanych wyników.

W manuskrypcie pracy zaznaczyłem fragmenty związane z nieprawidłową terminologią lub nieprecyzyjnymi sformułowaniami, które omówiłem z Autorem w aspekcie przygotowania pracy do publikacji.

### 4. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Bartosza Polnika stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego problematyki rekuperacji energii elektrycznej przez układ napędowy lokomotywy akumulatorowej użytkowanej w atmosferze potencjalnie wybuchowej i świadczy o ogólnej wiedzy Autora w dyscyplinie elektrotechnika, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki dotyczącej:

- budowy i działania układów napędowych z silnikami prądu stałego i silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi,
- projektowania układów zasilająco-sterujących,
- zasadniczych wymagań dotyczących bezpieczeństwa i ochrony zdrowia z uwzględnieniem stosowania napędów elektrycznych w warunkach zagrożenia wybuchem.

Autor wykazał się umiejętnością planowania i prowadzenia badań, analizy uzyskanych wyników, poprawnego wnioskowania oraz opracowania modeli wirtualnych wykorzystywanych w symulacji komputerowej, co potwierdza Jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Na podkreślenie zasługuje fakt prowadzenia przez Autora badań eksperymentalnych o szerokim zakresie ze względu na konieczność uwzględnienia wielu aspektów rozważanej problematyki. Badania były czasochłonne i wymagały opracowania specjalnej procedury uwzględniającej możliwość wybuchu mieszaniny gazów powstałej w wyniku wydzielającego się wodoru. Cenną cechą Autora jest umiejętność praktycznego wykorzystania wyników badań naukowych, a także projektowania układów sterowania.

Przedstawione uwagi dyskusyjne i krytyczne wynikają głównie z potrzeby uporządkowania pewnych fragmentów pracy. Część z nich została zamieszczona w celu inspiracji Autora do podjęcia dalszych działań z zakresu rozpatrywanej problematyki.

W mojej ocenie rozprawa odpowiada warunkom określonym w art. 13.1 Ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14.03.2003 w wersji obowiązującej od 01.10.2016 r (Dz. U. 2016.882 z 21.06.2016).

W związku z powyższym wnioskuję o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.