

Katowice, 16.06.2019r.

Dr hab. inż. Rafał Burdzik, prof. PŚ

Wydział Transportu

Politechnika Śląska

40-019 Katowice

Ul. Krasińskiego 8

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Jacka Wodeckiego

pt.

„Methods of multidimensional data processing for damage detection in mining machines”

„Metody przetwarzania danych wielowymiarowych w detekcji uszkodzeń maszyn górniczych”

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest pismo nr W6/940/2019 z dnia 21.05.2019 r. Dziekana Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej prof. dr. hab. inż. Moniki Hardygóry.

1. Ocena aktualności tematu rozprawy oraz poprawności sformułowanych celu i tezy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska dotyczy badań w zakresie opracowania metod detekcji uszkodzeń w maszynach górniczych z uwzględnieniem wielu źródeł danych. Diagnostyka techniczna w oparciu o metody wibroakustyczne jest stosowana w bardzo wielu obszarach wiedzy w różnych dyscyplinach naukowych. Dodatkowo jest to wiedza o charakterze silnie aplikacyjnym. Stąd tematyka rozprawy doktorskiej zapewne znajdzie liczne grono zainteresowanych odbiorców. Bardzo istotny jest także wybór obiektów badań. Maszyny górnicze charakteryzują się pracą pod dużym obciążeniem i w ekstremalnie trudnych warunkach środowiskowych, stąd diagnozowanie ich stanu technicznego jest dużym wyzwaniem badawczym. Należy także podkreślić aspekt bezpieczeństwa, który w warunkach kopalni jest nadzwyczaj istotny. Niebagatelne znaczenie ma także analiza ekonomiczna i bardzo wysokie

koszty naprawy i przestoju maszyn górniczych. **Wszystko to jednoznacznie wskazuje na poprawny wybór tematu rozprawy doktorskiej i aktualność problemów badawczych poruszanych przez Doktoranta.** Problematyka eksploatacji i utrzymania maszyn górniczych, a co za tym idzie monitorowania ich stanu technicznego, stanowią bardzo istotny obszar wiedzy w dziedzinie naukowej górnictwo i geologia inżynierska. Opracowane przez Doktoranta wielowymiarowe metody wykrywania uszkodzeń w maszynach górniczych, z wykorzystaniem miar temperaturowych i drganiowych, stanowią nowe holistyczne ujęcie w diagnostyce technicznej maszyn górniczych. Na podstawie przeprowadzonej analizy należy stwierdzić, że rozprawa ma charakter interdyscyplinarny. Biorąc pod uwagę obiekt badań oraz obszar potencjalnych zastosowań jednoznacznie można stwierdzić, że **tematyka oraz zakres rozprawy pozwala zakwalifikować ją do dyscypliny górnictwo i geologia inżynierska.**

Doktorant przedstawił w rozprawie jawny zapis opracowanych metod analitycznych oraz weryfikację tych metod na podstawie rzeczywistych danych pomiarowych w naturalnych warunkach pracy maszyn górniczych. Na podkreślenie zasługuje także szeroki wybór maszyn górniczych, który potwierdza uniwersalność opracowanych metod i potencjalnie duży obszar ich zastosowania. **W tym kontekście temat rozprawy należy uznać za aktualny, interesujący poznawczo i o dużym znaczeniu utylitarnym.**

Cel rozprawy zdefiniowano w rozdziale „Problem formulation”, jako:

- *Zastosowanie wielokanałowego systemu diagnostycznego i wielowymiarowych danych w analizie rzeczywistych wyników pomiarów w warunkach przemysłowych.*

Dodatkowo w rozdziale tym Autor definiuje sformułowania, które choć nie są nazwane tezami, zdecydowanie mają taki charakter. Na podstawie lektury można przyjąć, że Autor postawił następujące tezy pracy:

- *Dane wielokanałowe umożliwiają uzupełnienie niepełnych informacji pomiarowych, co poprawia jakość analizy i wiarygodność uzyskanych wyników;*
- *Analiza wielowymiarowych reprezentacji danych umożliwia lepszą ekstrakcję diagnostycznych cech składowych sygnału, przy udziale tłumienia wysokoenergetycznymi składowymi nośnymi i rzeczywistym szumem pomiarowym.*

Uważam, że cel i tezy pracy są prawidłowe i mają charakter twórczy.

2. Struktura i charakterystyka rozprawy

Treść opiniowanej rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jacka Wodeckiego zawiera się na 135 stronach, podzielonych na 8 rozdziałów, w tym 1 rozdział zawierający załączniki. Ponadto zamieszczono streszczenia w języku polskim i angielskim, spis rysunków i tabel oraz spis literatury, składający się z 134 pozycji (w tym 9 pozycji współautorskich). Całość rozprawy, z wyłączeniem streszczenia w języku polskim, jest napisana w języku angielskim, co uważam za dodatkową wartość opiniowanej rozprawy.

W pierwszym rozdziale znajduje się jednostronicowe wprowadzenie, w którym Autor wskazuje na potrzebę opracowania algorytmów analitycznych do wykrywania uszkodzeń w maszynach górniczych. Autor wskazuje na korzyści wynikające z prawidłowej oceny stanu technicznego maszyn jako poprawę bezpieczeństwa w miejscu pracy tych urządzeń (kopalni) oraz minimalizacji liczby uszkodzeń i kosztów eksploatacyjnych.

Rozdział drugi zawiera sformułowanie problemu badawczego, poprzedzonego krótką informacją na temat użyteczności diagnostycznej sygnałów pomiarowych. Następnie Autor przedstawia podstawowe informacje w zakresie drgań generowanych przez urządzenia z elementami wirującymi (maszyny obrotowe) oraz przykłady typowych uszkodzeń elementów tych maszyn. W rozdziale tym zawarto także opis zjawisk termicznych (sygnałów temperatury) w aspekcie funkcjonowania maszyn górniczych. Autor zwraca uwagę na trudność diagnozowania maszyn górniczych

pracujących w ciężkich oraz zmiennych warunkach eksploatacyjnych, uzasadniając tym wybór wielowymiarowych analiz, które zastosował w dalszej części rozprawy. Rozdział zakończony jest określeniem celu i tezy pracy, które zostały przedstawione na poprzednich stronach niniejszej opinii. Rozdział ten kończy się na 10 stronie.

W rozdziale trzecim Autor opisuje eksperymenty badawcze, wskazując zastosowane systemy pomiarowe oraz obiekty badań. Szeroki zakres badań obejmował pomiary sygnałów diagnostycznych w maszynach stacjonarnych i mobilnych. Przeprowadzono pomiary drgań: naziemnej przekładni przenośnika taśmowego, łożysk tocznych koła pasowego przenośnika, sprężarki tłokowej, kruszarki rudy miedzi. Dodatkowo w ramach poszerzonych eksperymentów przeprowadzono w warunkach eksploatacji podziemnej pomiary temperatury: płynu chłodzącego silnika samobieżnej ładowarki kołowej oraz obudowy przekładni w napędzie przenośnika taśmowego. Na wyróżnienie zasługuje szeroki poligon badawczy, który uwzględnia różne maszyny górnicze i analizę pojemności diagnostycznej dla sygnałów drganiowych i temperaturowych. Rozdział ten kończy się na 19 stronie.

Czwarty rozdział przedstawia krótki i przeglądowy opis aktualnego stanu wiedzy. Analiza ta ma jednak charakter syntezy wiadomości na podstawie bardzo wielu pozycji literaturowych. Uzasadnieniem takiego podejścia może być liczba stron poświęconych na opis pracy własnej Doktoranta. Biorąc pod uwagę poziom przedstawionych analiz należy jednoznacznie stwierdzić o dużej i aktualnej wiedzy Doktoranta w zakresie diagnostyki technicznej i analizy sygnałów. W tym ujęciu należy uznać przegląd wiedzy za wystarczający, w trosce o końcowy rozmiar ilościowy rozprawy. Rozdział ten kończy się na 26 stronie.

Rozdział piąty jest niewątpliwie najważniejszym rozdziałem rozprawy, w którym Doktorant opisuje opracowane metody analityczne. Autor przedstawia aż dziewięć algorytmów, które bazują na wielowymiarowej analizie sygnałów. Założeniem aplikacyjnym zaproponowanych metod jest automatyczny algorytm ekstrakcji charakterystycznych cech diagnostycznych w sygnałach rzeczywistych. Umożliwia to stwierdzenie występowania nieprawidłowości w pracy danej maszyny górniczej. Pierwsze cztery metody dotyczą analizy sygnałów temperaturowych, zarówno jedno-

jak i wielokanałowych. W celu analizy danych opisujących temperaturę cieczy chłodzącej silnik ładowarki kołowej Autor zaproponował dwie metody. Kolejne dwie metody opracowano dla zbiorów danych temperatury obudowy przekładni przenośnika. Druga grupa opracowanych metod dedykowana jest do analizy sygnałów wielokanałowych drganiowych. Dla drgań zarejestrowanych na przekładni przenośnika taśmowego zaproponowano czasowo-częstotliwościową metodę wykorzystującą koncepcję fuzji informacji z wielu kanałów oraz algorytm analizy składowych głównych. Kolejne trzy metody z wykorzystaniem algorytmów z grupy nieujemnej faktoryzacji macierzy zastosowano do analizy danych jednokanałowych. Dla tych metod także zastosowano analizy wielowymiarowe, jako reprezentacje czasowo-częstotliwościowe oraz częstotliwościowo-częstotliwościowe. Przekształcanie sygnałów do rozkładów wielowymiarowych umożliwiło precyzyjne rozpoznanie wzorców cech sygnału związanych z uszkodzeniami. Dodatkowo w tym rozdziale Autor zaproponował metodę optymalnego projektowania filtra na potrzeby przetworzenia jednokanałowego sygnału drganiowego zarejestrowanego na obudowie łożyska bębna napędowego przenośnika taśmowego. Opracowana metoda bazuje na wielokryterialnej optymalizacji filtra za pomocą algorytmu genetycznego. Doktorant proponuje dodatkowo autorskie rozszerzenie tej metody definiując tzw. progresywny algorytm genetyczny. Poza optymalnym dopasowaniem filtra do analizowanych danych jest on również w stanie optymalnie dobrać jego parametry. Rozdział ten kończy się na 55 stronie.

Rozdział szósty przedstawia wyniki weryfikacji opracowanych metod dla sygnałów rzeczywistych zarejestrowanych w warunkach eksploatacji maszyn górniczych. Układ rozdziału jest analogiczny jak w rozdziale piątym i w kolejnych podrozdziałach Autor przedstawia wyniki zaimplementowanych metod analitycznych dla kolejnych rzeczywistych sygnałów pomiarowych dla określonej grupy maszyn górniczych. Ta część pracy jest bardzo dobrze zilustrowana i zawiera zestawienia wybranych wyników dla wszystkich eksperymentów badawczych. **Należy więc jednoznacznie stwierdzić, że Autor zweryfikował w sposób doświadczalny zaproponowane w rozprawie metody analityczne.** Rozdział ten kończy się na 96 stronie.

Rozdział siódmy to podsumowanie całości rozprawy. Autor dokonał podziału podsumowania zgodnie z zakresem badań, na część dotyczącą analizy temperatur i część dotyczącą analizy drgań. Doktorant podsumowuje wszystkie opracowane przez siebie metody analityczne i formułuje wnioski na podstawie wyników otrzymanych w poprzednim rozdziale, z wyróżnieniem tych najważniejszych potwierdzających osiągnięcie celu i udowodnienie przyjętych tez rozprawy. Rozdział ten kończy się na 102 stronie.

Ostatni numerowany rozdział dziewiąty zawiera wykaz załączników z podstawami teoretycznymi narzędzi matematycznych, z których korzystał Doktorant we własnych opracowaniach. Rozdział ten kończy się na 117 stronie.

3. Ocena rozprawy

Merytoryczna ocena opiniowanej rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jacka Wodeckiego jest bardzo dobra. Podjęta tematyka jest ważna i ma charakter interdyscyplinarny i aplikacyjny. Pod względem rozważań teoretycznych i zastosowań praktycznych wnosi wkład w dyscyplinę górnictwo i geologia inżynierska, zaś jej użyteczny charakter może znaleźć zainteresowanie w obszarach inżynierii mechanicznej, diagnostyki technicznej i przetwarzaniu sygnałów. Na szczególną uwagę zasługuje wysoki poziom w zakresie sformalizowania metod analitycznych i ich weryfikacji na podstawie badań na obiektach rzeczywistych, co stanowi dużą wartość opiniowanej rozprawy.

Autor rozprawy udowodnił osiągnięcie założonego celu i potwierdził przyjęte w rozprawie tezy. Zaproponował metody przetwarzania danych wielowymiarowych w detekcji uszkodzeń maszyn górniczych. Doktorant prawidłowo zaplanował eksperymenty badawcze, na podstawie których zweryfikował opracowane metody analityczne. Tym samym należy uznać, że cel rozprawy został zrealizowany.

Autor nie ustrzegł się błędów gramatycznych i językowych, w tym polskich podpisów osi (rys. 6.7). Błędy te jednak nie wpływają na moją wysoką ocenę opiniowanej rozprawy doktorskiej.

Dlatego też moja ocena całości rozprawy doktorskiej jest jednoznacznie pozytywna.

4. Uwagi i zapytania

Staranna lektura rozprawy prowadzi do następujących uwag i pytań:

1. Czy w ramach propozycji metod bazujących na wielokanałowych systemach pomiarowych Autor zaproponował także formalną lokalizację czujników pomiarowych?
2. Jakie było kryterium doboru czasu i częstotliwości rejestracji sygnałów diagnostycznych?
3. Czy zastosowana w systemie SCADA zmienna częstotliwość próbkowania w zależności od ΔT nie stanowi problemu w zakresie analizy wielowymiarowej?
4. Czy rozważano możliwość zastosowania innych przekształceń czasowo-częstotliwościowych w proponowanych metodach, np. CWT, WVD?
5. W metodzie ICA (str. 28) w pierwszym kroku usuwa się część wartości ze zbioru danych, które są mniejsze od zera. Skąd w rejestrowanych sygnałach takie wartości?
6. W końcowym etapie metody ICA (str. 29) następuje segmentacja czasowa (wg daty) danych w oparciu o znaną częstotliwość próbkowania. Metoda ta zastosowana jest dla zbiorów danych rejestrowanych systemem SCADA, w którym częstotliwość próbkowania nie jest stała i zależy od ΔT . Jak zatem uzyskiwano informacje o przypisaniu kolejnych próbek sygnału do segmentacji czasowej?
7. Skąd na rys. 5.3, na którym przedstawiono wyniki pomiaru temperatury po pre-processingu, stały powtarzający się okres zmian wartości?
8. Autor w rozdziale 6.2.0.2 twierdzi, że po zastosowaniu PCA składowe impulsowe są znacznie bardziej widzialne w rozkładach czasowo-częstotliwościowych (rys. 6.21 i 6.22), co uzasadnia przekształceniem map 2D na jednowymiarowe rozkłady 1D. Czy przy takiej samej transformacji rozkładów 2D z rys. 6.21 do przebiegów 1D nie uzyskane zostaną także widoczne składowe sygnału?
9. Jak uzasadnić tak znaczące różnice wyliczanych wartości kurtozy przedstawione w tabeli 7.1?

10. Z uwagi na fakt, że Doktorant w rozprawie przedstawił tylko wybrane wyniki należy domniemywać, że są to najlepsze wyniki. Parafrazując Pana Prof. Piotra Krzyworzekę, specjalistę z analizy sygnałów quasistacjonarnych, który na jednej z konferencji powiedział „Wszyscy na referatach zawsze pokazują najlepsze wyniki, a ja pokazałem najgorsze i zadam Państwu pytanie dlaczego tak wyszło..”. Powstaje pytanie czy pozostałe wyniki analiz sygnałów rzeczywistych były zbieżne z tymi przedstawionymi w rozprawie?

Pozostałe uwagi językowe, gramatyczne i redakcyjne zaznaczyłem na otrzymanym egzemplarzu i nie mają one istotnego znaczenia dla wartości merytorycznej pracy.

5. Konkluzja

Opiniowana rozprawa doktorska mgr. inż. Jacka Wodeckiego wyróżnia się pod względami jakości prowadzonych rozważań analitycznych oraz weryfikacji na drodze badań eksperymentalnych na obiektach rzeczywistym w trudnych warunkach pracy maszyn górniczych. Całość rozprawy pokazuje logiczny i prawidłowy tok postępowania, charakterystyczny do prowadzenia badań naukowych. Pozwala to na wnioskowanie o umiejętności i dojrzałości mgr. inż. Jacka Wodeckiego w planowaniu i realizacji eksperymentów badawczych. **Należy jednoznacznie stwierdzić, że opiniowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie przez Doktoranta problemu naukowego i świadczy o jego dużej ogólnej wiedzy teoretycznej oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w dyscyplinie górnictwo i geologia inżynierska.** Dodatkowo należy podkreślić użyteczny charakter dysertacji co umożliwi ekstrakcję jej rezultatów do wielu obszarów inżynierskich.

Z uwagi na poruszaną w rozprawie tematykę przeanalizowałem także dorobek naukowy Autora, który jest wyróżniający się jak na młodego pracownika nauki. Wskazuje to, że problematyka pracy badawczej Pana mgr. inż. Jacka Wodeckiego jest aktualna, a jej wyniki znajdują uznanie recenzentów poczytnych czasopism międzynarodowych. Przykładowo artykuł dotyczący opracowanej metody, opisywanej w rozprawie doktorskiej, projektowania optymalnego filtra z użyciem koncepcji progresywnego algorytmu genetycznego do ekstrakcji impulsowej składowej sygnału o niskiej energii, związanej z uszkodzeniem lokalnym, z silnie zaszumionego sygnału

zarejestrowanego na maszynie górniczej w normalnych warunkach eksploatacyjnych został opublikowane w renomowanym czasopiśmie z tzw. listy filadelfijskiej: *Mechanical Systems and Signal Processing*, (impact factor IF=4.37).

Jako najistotniejsze osiągnięcia Pana mgr. inż. Jacka Wodeckiego przedstawione w opiniowanej rozprawie doktorskiej należy uznać opracowanie zestawu metod detekcji uszkodzeń lokalnych bazujących na ekstrakcji składowych impulsowych z wykorzystaniem technik nieujemnej faktoryzacji macierzy oraz opracowanie metody projektowania optymalnego filtra z użyciem autorskiej koncepcji progresywnego algorytmu genetycznego do ekstrakcji impulsowej składowej sygnału o niskiej energii, związanej z uszkodzeniem lokalnym.

Przedstawione uwagi nie mają większego wpływu na fakt samodzielnego zrealizowania przez Autora zadania naukowo-badawczego. Do rozwiązania zagadnienia Doktorant wykazał się wiedzą z analizy sygnałów, wykorzystał poprawnie dobrane metody badawcze wykazując się umiejętnością prowadzenia eksperymentu oraz skutecznie przeprowadził weryfikację opracowanych metod.

Uważam, że opiniowana rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Jacka Wodeckiego pt. „*Methods of multidimensional data processing for damage detection in mining machines*” spełnia wymogi określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki. Może zatem służyć jako podstawa do rozpatrzenia wniosku o nadanie Kandydatowi stopnia doktora nauk technicznych. W związku z powyższym stawiam wniosek o dopuszczenie mgr. inż. Jacka Wodeckiego do publicznej obrony opiniowanej rozprawy jako dzieła w zakresie dyscypliny górnictwo i geologia inżynierska.

Jednocześnie z uwagi na moją bardzo dobrą ocenę rozprawy, wysoce nowatorski charakter i międzynarodowy poziom osiągniętych wyników oraz użyteczne znaczenie oraz dojrzałość i rzetelność badawczą Kandydata, wnoszę wniosek do Wysokiej Rady Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej o wyróżnienie przedmiotowej rozprawy doktorskiej.

Rafał Bmódek