

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”

1. Wprowadzenie

Recenzji rozprawy doktorskiej dokonano na podstawie uchwały Rady Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej z dnia 15 maja 2019r., w oparciu o otrzymany egzemplarz rozprawy doktorskiej, przekazany wraz z pismem przewodnim, z dnia 21.05.2019r., sygnowanym przez Dziekana Wydziału, Panią prof. dr hab. inż. Monikę Hardygórę.

2. Charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska pt.: „Methods of multidimensional data processing for damage detection in mining machines”/„Metody przetwarzania danych wielowymiarowych w detekcji uszkodzeń maszyn górniczych” zawiera 135 stron i składa się z 8 rozdziałów, bibliografii oraz spisu rysunków i tabel. Spis literatury zawiera 134 pozycje, w tym 9 prac z udziałem autora rozprawy, związane merytorycznie z jej tematem.

2.1. Ocena zasadności wyboru tematu i zakresu pracy

W chwili obecnej coraz bardziej istotnym zagadnieniem w eksploatacji złożonych i w większości zautomatyzowanych, górniczych systemów produkcyjnych, jest monitorowanie stanu i diagnostyka elementów tych systemów. Wśród tych elementów najistotniejsze znaczenie, jak wykazuje praktyka, mają łożyska i przekładnie mechaniczne, występujące np. w zespołach przenośników taśmowych czy zgrzeblowych. Do celów monitorowania stanu aktualnie powszechną praktyką jest wykorzystywanie sygnałów drganiowych towarzyszących pracy

poszczególnych podzespołów napędowych czy całych maszyn lub urządzeń. W przypadku wysoko obciążonych maszyn mobilnych problemem zgłaszanym przez firmy wydobywcze jest często pojawiające się przegrzewanie ich układów napędowych. Doktorant słusznie zauważa, że potrzeba utrzymania zakładanej wydajności wspomnianych ciągów technologicznych czy indywidualnych maszyn wymusza stosowanie coraz bardziej zaawansowanych algorytmów przetwarzania pozyskiwanej informacji diagnostycznej, gdyż rzeczywiste sygnały pomiarowe zawierają zarówno składowe losowe jak i zdeterminowane. W efekcie, istotna z punktu widzenia monitorowania stanu czy diagnostyki informacja, jest ukryta i często zakłócana poprzez towarzyszący „szum informacyjny”. Występujące zależności są najczęściej nieliniowe, potencjalne uszkodzenia mają charakter lokalny i rozproszony a obciążenia robocze maszyn i oddziaływania środowiskowe na nie, są zmienne w czasie i bardzo zróżnicowane. Doktorant słusznie zauważa również, że informacja o potencjalnych uszkodzeniach zawarta w surowych sygnałach pomiarowych jest maskowana przez różnego rodzaju szum (zwłaszcza inny niż o rozkładzie Gaussa), trudna do wykrycia w danych zmiennie- okresowych, stąd też poprawne wykrywanie pojawiających się potencjalnie uszkodzeń jest znacznie utrudnione, a w efekcie prognozowanie na temat stanu obiektów jest często obarczone bardzo dużym błędem.

Stąd też uważam, że podjęta tematyka jest aktualna i ważna dla szeregu branż przemysłu.

Jako cel pracy doktorant przyjął rozwiązanie problemów narzuconych przez analizę rzeczywistych danych przemysłowych poprzez wykorzystanie diagnostycznych, wielokanałowych danych pomiarowych, przy użyciu wielowymiarowych technik analitycznych aby zwiększyć jakość uzyskanych informacji diagnostycznych oraz zwiększyć pewność wnioskowania diagnostycznego czy prognozowania stanu.

Tezy pracy doktorant sformułował następująco:

- Wykorzystanie wielu kanałów pomiaru jest cenną zaletą, która pozwala uzyskać bardziej kompletne informacje niż w przypadku pomiaru jednokanałowego. Informacje w jednym kanale są często niekompletne lub niepewne. Dane wielokanałowe umożliwiają uzupełnienie informacji między kanałami, co poprawia nie tylko łatwość analizy, ale także wiarygodność uzyskanych wyników.
- Analiza wielowymiarowych reprezentacji danych może zapewnić lepszy wgląd w cechy komponentu lub zdarzenia występujące w sygnale. Jest to szczególnie ważne, biorąc pod uwagę fakt, że bardzo często poszukiwana informacja jest silnie tłumiona przez hałas o wysokiej energii występujący w rzeczywistych pomiarach. Oprócz samego szumu nawet

komponenty opisujące zwykłe działanie maszyny mogą utrudniać wykrycie informacji o uszkodzeniu.

- Najbardziej korzystny przypadek ma miejsce, gdy dostępne są wielowymiarowe dane diagnostyczne, a ich charakter pozwala na wykorzystanie wielowymiarowych technik do szczegółowego badania komponentów sygnału związanych z uszkodzeniami.

2.2. Ogólna charakterystyka pracy

Rozdział pierwszy rozprawy to Introduction/wprowadzenie, w którym krótko zostały przedstawione przesłanki do podjęcia tematu pracy. Doktorant podkreśla trudności w monitorowaniu stanu maszyn i urządzeń górniczych wynikające z klimatu i bardzo ciężkich warunków terenowych w jakich są eksploatowane. Z drugiej strony zauważa, że tematyka wykrywania i eliminacji usterek przedmiotowych maszyn, rzutujących na efekty ekonomiczne firm je użytkujących, przekłada się również na zainteresowania tą tematyką firm ubezpieczeniowych (wysokość stawek ubezpieczeniowych). Powyższe czynniki ukształtowały również naukowe zainteresowania opiniowanego.

Rozdział drugi zawiera sformułowanie problemu badawczego/Problem formulation. Doktorant zauważa, że aktualnie typowym działaniem w diagnostyce i monitorowaniu maszyn, jest analiza drganiowych sygnałów diagnostycznych, które zawierają komponenty wynikające z samej konstrukcji maszyny (częstotliwości charakterystyczne), związane z potencjalnym uszkodzeniem oraz szum tła o zróżnicowanej charakterystyce, wynikającej z określonych warunków realizacji procesów technologicznych. Równocześnie, szczególną uwagę zwraca się na inne czynniki mające wpływ na możliwości poprawnego diagnozowania określonej grupy maszyn, tj. np. temperaturę zespołów roboczych, ciśnienie płynów eksploatacyjnych, prędkości i momenty obrotowe i inne. Dla celów rozprawy autor wprowadza termin „impuls”, poprzez który, rozumie krótkotrwałe zdarzenie szerokopasmowe w sygnale, które jest generalnie powodowane przez pewien rodzaj oddziaływania występującego w maszynie lub będącego wynikiem zdarzenia zewnętrznego. Takie zdarzenia, zdaniem autora rozprawy, można podzielić na dwie grupy, tj. artefakty (np. wynik uderzenia przypadkowego przedmiotu o obudowę maszyny) oraz hałas impulsowy generowany w określonych procesach produkcyjnych.

Kolejnym aspektem, na który doktorant zwraca uwagę to jest problematyka detekcji uszkodzeń elementów maszyn i urządzeń w oparciu o sygnał temperatury. Z uwagi na swe doświadczenia, doktorant skupia się w rozprawie na temperaturze przekładni zabudowanych w stacjach napędowych kopalnianych przenośników taśmowych, kruszarki oraz maszyn LHD,

eksploatowanych w kopalniach podziemnych. Doktorant zauważył, że złożone cykle robocze maszyn LHD, wpływające na kształtowanie się przedmiotowej temperatury sprawiają, że w analizie danych pomiarowych niezbędne jest stosowanie zaawansowanych algorytmów uwzględniających np. dystrybucję danych, kształty i struktury sygnałów itp., kładąc szczególnie nacisk na zasadność rozwijania technik analityki wielowymiarowej.

Rozdział 3 Objects and experiments, dotyczy obiektów badań, stosowanej aparatury pomiarowej rejestrowanych wielkości, zależnie od obiektu badań. Przedmiotem analizy były dane drganiowe zmierzone na maszynach takich jak dwustopniowa przekładnia zębata napędu przenośnika taśmowego, łożysko bębna napędowego taśmy przenośnika, kompresor pracujący na platformie wiertniczej wydobycia ropy naftowej, oraz kruszarka młotkowa rudy miedzi. Dane temperaturowe pochodziły natomiast z ładowarki pracującej w podziemnej kopalni rudy miedzi oraz, podobnie jak w przypadku danych drganiowych, przekładni przenośnika taśmowego. Ponadto opisany jest sposób rejestracji danych na wymienionych maszynach.

Rozdział 4 to State of art/Stan wiedzy. Przedstawiono zarys wiedzy związanej z realizowanym tematem, w tym zwłaszcza detekcji uszkodzeń w oparciu o sygnały drganiowe (rozdz. 4.1) oraz możliwości oceny stanu/detekcji uszkodzeń w oparciu o pomiar temperatury wybranych węzłów maszyn i urządzeń.

Rozdział 5 – Novel methodology for damage detection/ Nowa metodologia wykrywania uszkodzeń, zawiera propozycję nowej metody oceny stanu w oparciu o pomiary temperatury podzespołów obiektów, w tym zwłaszcza w odniesieniu do ładowarek górniczych typu LHD. Rozdział ten, zdaniem opiniującego, jest najistotniejszy dla wartości prezentowanej rozprawy. Obejmuje szereg algorytmów zaproponowanych do przetwarzania surowych danych pomiarowych celem ekstrakcji informacji istotnych dla oceny stanu obiektu. Przedstawiono charakterystykę opracowanych przez doktoranta metod analitycznych. W pierwszej części opisane są cztery metody analizy danych temperaturowych, zarówno jedno- jak i wielokanałowych. Dwie z przedstawionych metod dotyczyły analizy danych pochodzących z przekładni przenośnika, a dwie kolejne – danych dotyczących temperatury cieczy chłodzącej silnik ładowarki kołowej. Przedstawiona także metoda analizy wielokanałowych danych drganiowych zmierzonych na przekładni przenośnika, skupia się na fuzji informacji z wielu kanałów pomiarowych z wykorzystaniem analizy składowych głównych bazując na czasowo-częstotliwościowych reprezentacjach danych. W dalszej części rozdziału doktorant opisuje trzy metody analizy danych drganiowych z wykorzystaniem technik z rodziny nieujemnej faktoryzacji macierzy. Analizie poddane zostały wielowymiarowe reprezentacje czasowo-częstotliwościowe oraz częstotliwościowo-częstotliwościowe, co pozwoliło na precyzyjne

rozpoznanie wzorców uszkodzeń. W końcowej części rozdziału doktorant opisał metodę optymalnego projektowania filtra na potrzeby przetworzenia sygnału drganiowego pochodzącego z łożyska bębna napędowego przenośnika taśmowego. Technika oparta jest na optymalizacji filtra algorytmem genetycznym, natomiast doktorant zaproponował nowatorskie rozszerzenie tego podejścia definiując tzw. progresywny algorytm genetyczny, który poza optymalnym dopasowaniem filtra do podanego sygnału, jest również w stanie optymalnie dobrać poziom jego złożoności.

W rozdziale szóstym zaprezentowane zostały wyniki działania metod opisanych we wcześniejszej części rozprawy. Jedną z najważniejszych zalet przedstawionych algorytmów jest pełna automatyka ich działania, co znacznie ułatwia ich użytkowanie, zwłaszcza przez osoby nieposiadające doświadczenia analitycznego. W oparciu o przykładowe dane, wszystkie metody wykazały się wysoką skutecznością działania oraz jakością otrzymanych wyników.

Rozdział siódmy zawiera podsumowanie pracy, również z podziałem na analizy temperatur oraz drgań w procesie monitorowania stanu. Doktorant podsumowuje pokrótce każdą z opracowanych metod analitycznych, jak również przedstawia szczegółowe wnioski sformułowane na podstawie otrzymanych wyników.

Rozdział 8 – Appendix/Załącznik, zawiera opis stosowanych algorytmów, transformat i metod przetwarzania sygnałów diagnostycznych.

2.3. Ocena realizacji celu naukowego pracy

Cele naukowe pracy zostały osiągnięte poprzez opracowanie opisanych powyżej algorytmów do filtracji i przetwarzania wielokanałowych danych pomiarowych oraz ich pozytywną weryfikację w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych/diagnostycznych.

Ważnym osiągnięciem doktoranta jest zatem doświadczalne (eksploatacyjne) potwierdzenie poprawności zaproponowanych rozwiązań w konkretnych zastosowaniach przemysłowych.

2.4. Oryginalność pracy

Oryginalność recenzowanej rozprawy przejawia się w :

- opracowaniu kompleksowej procedury optymalizacji projektowania filtra do ekstrakcji niskoenergetycznego sygnału zawierającego informację o uszkodzeniu lokalnym

z zaszumionego sygnału zarejestrowanego na maszynie górniczej w warunkach normalnej eksploatacji

- opracowaniu koncepcji zastosowania procedur faktoryzacji macierzy dla danych wielowymiarowych w celu separacji składowych impulsowych na potrzeby detekcji uszkodzeń lokalnych, w oparciu o:
 - a) dane z mapy częstotliwość-częstotliwość (analizy cyklostacjonarne) dla przypadku obecności w sygnale cyklicznych impulsów związanych z uszkodzeniem łożyska oraz cyklicznych zaburzeń impulsowych związanych z pracą tłoków kompresora,
 - b) dane z mapy czasowo-częstotliwościowej (spektrogram) dla przypadku obecności cyklicznych impulsów związanych z uszkodzeniem oraz niecyklicznych zaburzeń o charakterze impulsowym – diagnostyka łożyska w kruszarce.

Wyniki tych rozważań zostały opublikowane w Mechanical Systems and Signal Processing (impact factor IF=4.37), co potwierdza ich dużą wartość naukową.

2.5. Uwagi szczegółowe do pracy

W opisie rysunków przytaczanych w poszczególnych rozdziałach rozprawy zauważyłem brak odniesień do źródeł. Czy rysunki są autorstwa doktoranta, czy nie były one już wcześniej publikowane przypadkiem we wcześniejszych opracowaniach ?

W opisie rysunku 6.23 brak oznaczeń w języku angielskim (częściowo jest opis w języku polskim) – podczas gdy całość pracy napisana jest w języku angielskim.

Str. 25³ – brak numeracji pozycji literaturowej, jest [?]

Str. 26² – jest „... applied to win turbines..”. Raczej chodzi o “ .. wind turbines ..”.

2.6. Inne uwagi – do dyskusji

Z uwagi na tematykę rozprawy, sprawą dyskusyjną jest brak odniesienia do problematyki wpływu temperatury na lepkość oleju np. w przekładniach co ma przełożenie na zróżnicowane tłumienie generowanych drgań w tych strukturach. Ponadto, z praktyki wynika, że w układach napędowych pracujących w ciężkich warunkach takich jak górnicze, często dochodzi do przedwczesnego zużywania się uszczelnień co skutkuje wyciekami oleju np. z przekładni, zmieniając znacznie ich objętość roboczą w przedmiotowych obiektach. W efekcie, to również istotnie wpływa to potencjalne zmiany w tłumieniu drgań generowanych w rozwijających się

uszkodzeniach elementów składowych struktury, np. przekładni, finalnie na rejestrowany obraz drganiowy obiektu.

Ponieważ doktorant stara się budować „hybrydowe” metody diagnostyczne, oparte między innymi na analizie, po pierwsze sygnałów drganiowych, a po drugie temperatury, jak zdaniem doktoranta, powyższe czynniki mogą się odbijać na skuteczności diagnozowania w proponowanej metodzie oceny stanu?

Z niektórych danych literaturowych wynika (np.: Rzeszucinski P.J., Sinha J. K., Edwards R., Starr A., Allen B.: “Normalised Root Mean Square and Amplitude of Sidebands of Vibration Response as Tools for Gearbox Diagnosis”. 2012 Wiley Publishing Ltd . Strain (2012) 48(6), 445–452 445, DOI: 10.1111/j.1475-1305.2012.00839.x), że zasadniczo zachowanie kurtozy czyni tę dyskryminantę nieodpowiednim narzędziem do wczesnego wykrywania usterek przekładni z powodu późnego wskazywania rozwoju uszkodzenia. Ponadto wykazano, że przebieg zmian wartości kurtozy w czasie rozwoju uszkodzeń, może być funkcją niemonotoniczną, co wprowadza pewną niepewność w zakresie wnioskowania o stanie obiektu. Czy proponowana przez doktoranta „hybrydowa” metoda diagnostyki pozwala te mankamenty pokonać?

3. Ogólna ocena rozprawy

Rozprawa dotyczy trudnej i złożonej tematyki eksploatacji zróżnicowanych, górniczych systemów produkcyjnych opartych między innymi na przenośnikach taśmowych. Autor przedstawił nowatorskie metody analityczne przeznaczone do diagnostyki ciężkich maszyn górniczych, zarówno mobilnych (maszyny samobieżne), jak i stacjonarnych (jednostki napędowe, kruszarki), a także konkretnych ich komponentów (np. przekładnie i łożyska).

Opracowane stanowiska badawcze, algorytmy i programy komputerowe, pozwoliły na przeprowadzenie unikatowych badań doświadczalnych oraz prac analitycznych, których wyniki znacząco rozszerzają stan wiedzy w poruszanej tematyce a co jest najważniejsze, są odpowiedzią na pytania stawiane bezpośrednio przez producentów i eksploataatorów tych urządzeń (bezpośrednie przełożenie na praktykę). Z tego też względu oceniam rozprawę bardzo wysoko.

4. Wniosek końcowy

Recenzowana praca zawiera wartościowe wyniki badań. Należy podkreślić ich dużą złożoność i skalę.

Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie przez doktoranta problemu naukowego (zdefiniowanego w celu pracy), ma duże znaczenie aplikacyjne, a uzyskane wyniki mogą być wykorzystane w dalszych pracach nad doskonaleniem systemów monitorowania i diagnostyki stanu złożonych, górniczych systemów produkcyjnych (wiele aspektów już zastosowano w praktyce, w zakładach np. KGHM).

Autor wykazał się dobrym zrozumieniem między innymi problematyki filtracji i przetwarzania wielokanałowych danych pomiarowych celem ekstrakcji istotnej dla diagnostyki obiektu informacji, oraz znajomością literatury naukowej i technicznej dotyczącej przedmiotu badań. Szereg prowadzonych analiz wymagało zastosowania bardzo zaawansowanego aparatu matematycznego i informatycznego, co wykazuje dobre przygotowanie doktoranta w tym zakresie. Biorąc pod uwagę całość pracy tj. jej wartość naukową i poznawczą oraz wkład własny doktoranta uważam, że rozwiązał on ważny problem z zakresu dyscypliny naukowej *górnictwo i geologia inżynierska*.

Stąd też stwierdzam, że rozprawa doktorska 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” spełnia wymogi stawiane w obowiązującej Ustawie z dnia 14 marca 2003r., o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuk (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z 2003r.) z późniejszymi zmianami. Wnioskuje zatem o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Mając na uwadze znaczenie wyników przeprowadzonych eksperymentów dla praktyki (w tym zwłaszcza przemysłu wydobywczego), zakres badań, unikalność opracowania, formę graficzną pracy, **wnioskuję także o wyróżnienie przedmiotowej rozprawy.**

