

Kraków, 8.05.2018

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr Grzegorza Żaka pt.

**Local damage detection methods in mining machines
in the presence of non-Gaussian noise**
*(Metody detekcji uszkodzeń lokalnych w maszynach
górnictwowych w obecności niegaussowskich zakłóceń)*

Promotorzy:

dr hab. inż. **Radosław Zimroz**, prof. PWr
dr hab. inż. **Agnieszka Wyłomańska**, prof. PWr

1. Wstęp

Recenzję rozprawy doktorskiej pod wyżej wymienionym tytułem opracowano na podstawie zlecenia Dziekana Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej z dn. 9.04.2018.

Rozprawa została napisana w języku angielskim ze streszczeniem w języku polskim. Praca liczy 132 strony, składa się z 9 rozdziałów i zawiera wykaz bibliograficzny liczący 144 pozycje. Zawiera też spis rysunków oraz tabel.

Rozprawa dotyczy opracowania zestawu metod do wykrywania uszkodzeń lokalnych maszyn wirnikowych, przede wszystkim przekładni i łożysk tocznych w obecności szumu o charakterze nie-gaussowskim. Praca przedstawia szczegółowo opracowane metody, łącznie z wymaganym aparatem matematycznym. Metody były testowane na sygnałach symulowanych, a następnie na danych zmierzonych na obiektach rzeczywistych.

Praca została przeze mnie rozpatrywana jako osiągnięcie w dyscyplinie naukowej Górnictwo i Geologia Inżynierska.

2. Treść rozprawy

Rozprawa składa się z 9 rozdziałów oraz bibliografii, liczącej 144 pozycje. Praca zawiera też spis rysunków i tabel. Praca nie zawiera natomiast spisu oznaczeń ani stosowanych skrótów.

Rozdział 1 zawiera krótki wstęp do problematyki wykrywania uszkodzeń lokalnych w maszynach górnictwowych. Autor uzasadnia celowość podjęcia prac badawczych w tej dziedzinie. Wskazuje również na podmioty zainteresowane efektami tych prac. Przede wszystkim są to właściciele i użytkownicy, ale również przedsiębiorstwa ubezpieczeniowe. Podkreślona jest istotność wykrywania uszkodzeń już w ich wczesnej fazie rozwoju oraz, co jest również ważne, możliwość śledzenia ich rozwoju. Informacje te umożliwiają z kolei prognozowanie co jest podstawą do planowania eksploatacji maszyn górnictwowych. W rozdziale tym Doktorant

formułuje zasadniczy problem badawczy, który będzie rozwiązywał w swojej pracy, a także opisuje dlaczego jest istotny szczególnie w kontekście maszyn stosowanych w górnictwie.

Rozdział 2 formułuje szczegółowo problem badawczy. Zawartość rozdziału opiera się na celu (zdefiniowanym w rozdziale 1) i opisuje komponenty sygnałów drganiowych mierzonych przez czujniki drgań. Doktorant przedstawia uszkodzenia lokalne przekładni i łożysk tocznych. Następnie opisuje strukturę sygnałów generowanych przez uszkodzenia lokalne w tych elementach maszyn. Znaczenie i specyfika sygnałów drganiowych w maszynach górniczych są opisane w kolejnym podrozdziale pracy. Ostatni podrozdział przedstawia najważniejsze pojęcia z zakresu przetwarzania sygnałów, na których będą bazować rozwijane metody.

Rozdział 3 przedstawia obecny stan wiedzy w zakresie wykrywania uszkodzeń lokalnych, szczególnie w obecności zakłóceń. Autor przedstawia bardzo szeroki i aktualny przegląd literatury przedmiotu. Wykazuje, że problem wykrywania uszkodzeń w obecności szumów nie-gaussowskich jest bardzo trudny i ogromna większość prac skupia się na przypadkach łatwiejszych do analizy.

Rozdział 4 jest zasadniczą częścią pracy. Doktorant przedstawia w nim opracowane przez siebie metody diagnostyczne. Jest to bardzo szerokie spektrum metod, a jego omówienie przedstawię w kolejnym rozdziale recenzji.

Rozdział 5 przedstawia maszyny, które były przedmiotem badań Doktoranta. Są to elementy układów napędowych przenośników taśmowych (koła zębate w przekładni zębatej, łożyska toczne w bębnach napędowym przenośnika) oraz łożyska toczne w kruszarkach stosowanych w przeróbce mechanicznej (kruszeniu) rud miedzi.

Rozdział 6 jest poświęcony przetestowaniu metod zaproponowanych w rozdziale 4 na danych symulowanych. Autor szczegółowo przedstawia modele sygnałów, które wykonał na potrzeby testowania metod. Są one dokładnie opisane i reprezentują rosnącą skalę trudności w detekcji i lokalizacji uszkodzeń. Kolejną – zasadniczą – częścią rozdziału 6 jest opis rezultatów otrzymanych dla każdej z opracowanych metod dla każdego z trzech przypadków numerycznych.

Rozdział 7 przedstawia wyniki zastosowania opracowanych metod do danych zarejestrowanych na maszynach rzeczywistych. Dane zostały przygotowane we wzrastającym stopniu trudności. Autor opisuje też przypadki, gdy niektóre metody nie dały pozytywnych rezultatów i nie były w stanie wykryć uszkodzenia, co ma również dużą wartość naukową.

Rozdział 8 zawiera podsumowanie rozprawy. Zawarto w nim wnioski wynikające z wykonanych badań oraz uwagi końcowe.

Rozdział 9 jest dodatkiem i zawiera najważniejsze pojęcia matematyczne z zakresu przetwarzania sygnałów używane w pracy.

3. Analiza krytyczna

3.1. Uwagi ogólne

Wykrywanie uszkodzeń lokalnych maszyn wirnikowych jest istotnym problemem badawczym. Dzięki znajomości stanu technicznego maszyn jesteśmy w stanie: wykryć uszkodzenie, zlokalizować je i ocenić jego stopień zaawansowania. Jest to klasyczna już

sekwencja stosowana w diagnostyce. W praktyce ogromną korzyścią płynącą z takiej wiedzy jest śledzenie rozwoju uszkodzenia w czasie, a często ustalenie zależności między tempem rozwoju uszkodzenia a parametrami eksploatacyjnymi, jak np. moc bądź temperatura otoczenia. Dla przedsiębiorstwa z kolei zasadniczą korzyścią jest możliwość prognozowania eksploatacji, a co za tym idzie – planowania remontów i innych działań z zakresu utrzymania ruchu maszyn. Zadania diagnostyki technicznej znacznie się komplikują, gdy sygnały oprócz sygnału użytecznego zawierają też komponent szumu. Jednak gdy szum ma charakter procesu gaussowskiego, istnieje szereg metod, które pozwalają na wyekstrahowanie informacji o stanie technicznym nawet przy niskim poziomie sygnału do szumu. Jeżeli jednak szum przestaje mieć charakter gaussowski, a np. ma charakter impulsowy, wtedy sytuacja znacznie się komplikuje. Doktorant doskonale zdaje sobie sprawę z tej zależności i poprawnie wskazuje, że jest to bardzo istotny problem w górnictwie. Znaczna część metod diagnostycznych stosowanych np. w energetyce po prostu nie będzie działać w silnie zaszumionym środowisku górniczym. Z drugiej jednak strony – jak również trafnie wskazuje p. Grzegorz Żak – awarie maszyn górniczych mają bardzo poważne konsekwencje i oprócz zagrożenia zdrowia i życia mogą spowodować konieczność nieplanowanego wyłączenia z eksploatacji np. całej odstawy. Powoduje to ogromne straty finansowe, jest więc naturalna kolejną rzeczą że celowe jest prowadzenie badań w zakresie rozwoju metod wykrywania uszkodzeń w takich specyficznych dla maszyn górniczych warunkach. Tak więc wybrany przez Doktoranta problem badawczy jest istotny i aktualny.

Autor przeprowadził wyczerpującą analizę literatury światowej w badanej dziedzinie. Znaczną część cytowanych przez Niego prac stanowią prace prowadzone przez inne ośrodki, publikowane w literaturze o zasięgu światowym. Zestawienie obejmuje zarówno pozycje klasyczne, jak i najnowsze artykuły w periodykach naukowych. Wykazał, że jego praca jest na bardzo wysokim poziomie, co potwierdza też lista artykułów Doktoranta opublikowana w najlepszych światowych czasopismach z omawianej dziedziny.

Silną stroną pracy jest dobry aparat matematyczny, który znacznie wybiega poza standardowo stosowane metody, takie jak proste estymatory albo analiza częstotliwościowa. Autor proponuje metody wykorzystujące bardzo zaawansowane techniki, takie jak analiza poszczególnych parametrów rozkładów prawdopodobieństwa, zaawansowane procedury filtracji sygnałów czy wreszcie miary podobieństwa rozkładów. Implementacja metod wykazała dużą biegłość Doktoranta w środowisku Matlab, co będzie bardzo cenne dla jego dalszej kariery naukowej.

Wartość zaproponowanych metod potwierdza ich weryfikacja. Autor poprawnie przyjął najpierw testy na danych symulowanych. W takim środowisku kontrolowane są wszystkie parametry sygnału. Autor zaproponował bardzo ciekawy model sygnału, który może być wykorzystany przez niego w przyszłości, jak również przez inne grupy badawcze. Pożądane byłoby wręcz opracowanie i upowszechnienie „standardu” sygnałów, które powinny być stosowane przez badaczy z całego świata do weryfikacji ich nowych metod. Jest to analogia standardowych problemów stawianych w sztucznej inteligencji. Mam nadzieję, że modele sygnałów zaproponowane przez p. Grzegorza Żaka byłyby użyteczne w takiej bibliotece sygnałów.

Kolejnym etapem weryfikacji są dane rzeczywiste. Praca omawia badane maszyny górnicze i poświęca im osobny rozdział. Przykłady zostały dobrane i przedstawione w taki sposób, aby stopniować trudność kolejnych przypadków. Dane zostały dobrze opisane i rzeczywiście oddają rzeczywiste trudności spotykane w diagnostyce maszyn górniczych.

Pomimo pozytywnej oceny całości pracy, mam jednak kilka uwag, zarówno ogólnych, jak i szczegółowych.

Lektura pracy nie jest łatwa, szczególnie ze względu na bardzo oszczędną, można wręcz powiedzieć lakoniczną, formę pracy. Opisy są bardzo skrócone, a przedstawione wprowadzenie nie będzie wystarczające dla czytelników bez dużego doświadczenia w omawianej tematyce. Myślę, że praca zyskałaby na rozwinięciu opisów, szczególnie w rozdziałach od 4 do 7 oraz w dodatku.

Autor wspomina o dwóch opublikowanych wcześniej metodach, które powstały w celu wykrywania cyklicznych impulsów, mianowicie o protrugramie oraz MID (*Modulation Intensity Distribution*). Bardzo interesujące poznawczo byłoby porównanie ich właśnie z metodami zaproponowanymi w pracy. W pracy zaprezentowano porównanie z klasycznymi metodami wykorzystującymi kurtozę w dziedzinie czasu, które nie analizują informacji z dziedziny częstotliwości.

W niektórych, najtrudniejszych przypadkach, tylko niektóre z zaproponowanych metod były w stanie wykryć uszkodzenia maszyn. Sytuacja tak jest np. opisana w rozdziale 6.4.1 i 7.4.1. W drugim z tych przypadków Autor stwierdza w nim, że przedstawił wyniki tylko jednej metody (FLOC), ponieważ były najlepsze. Stwierdza dalej, że wyniki innych metod nie były aż tak efektywne i dlatego nie będą przedstawione. W nauce wynik negatywny też jest istotny dla rozwoju wiedzy i posiada istotną wartość poznawczą. Nie jest też jasne stwierdzenie, że wyniki były „not as effective” (co można przetłumaczyć, „nie były aż tak efektywne” [jak zaprezentowana metoda]) i nie wynika z niego czy inne metody działały nieco gorzej, dużo gorzej, czy w ogóle.

W ramach problemów do dyskusji, proszę o wyjaśnienie następujących kwestii:

1. Bardzo istotną częścią procesu ekstrakcji sygnału jest wyznaczenie pasma informacyjnego, w którym zawiera się jego najciekawsza część. Zadanie takie pełni filtracja wykorzystująca parametry α i σ , opisana w rozdziale 4.3.3, a następnie 6.2.1. Rezultatem tej metody jest de facto filtr pasmowo przepustowy, który jest zastosowany do filtracji oryginalnego sygnału drganiowego przed jego analizą. Jest to działanie analogiczne do standardowej procedury wąskopasmowej analizy obwiedni (NEA). Doktorant nie opisał, czym różni się tak otrzymany filtr od klasycznego filtru pasmowo-przepustowego. Ciekawe również byłoby porównanie efektów zaproponowanej metody z klasyczną metodą NEA.
2. Zaproponowane metody są bardziej skomplikowane niż metody klasyczne. Doktorant nie zamieścił informacji na temat złożoności obliczeniowej poszczególnych metod, co byłoby bardzo przydatną informacją dla ich dalszego rozwoju a także perspektyw praktycznego zastosowania w systemach ciągłego monitorowania.
3. Poszukiwaną częstotliwością charakterystyczną maszyny rzeczywistej w rozdziale 7.2 jest 12.69 Hz. Mimo to, na wielu wykresach zamieszczonych w rozdziale 7.2 (7.12, 7.20, 7.23, 7.26, 7.29) widoczne są dwie linie widmowe wokół poszukiwanej. Prawdopodobnie nie jest to efekt szumu w sygnale, ponieważ powtarza się na wielu wykresach. Czy Doktorant może skomentować ten wynik?

3.2. Uwagi szczegółowe

Uwagi szczegółowe odnoszą się do zauważonych w rozprawie drobnych błędów edycyjnych. Istotnym brakiem jest brak zestawienia użytych skrótów oraz symboli.

W pracy znalazły się też drobne błędy natury stylistycznej i językowej, jak np.:

- w bibliografii znajdują się prace które nie zachowują kolejności alfabetycznej
- na niektórych stronach brakuje numeracji stron
- w wielu miejscach użyty jest skrót „w.r.t”, który nie jest objaśniony
- na rys. 2.6 brakuje opisów poszczególnych jego części (jest to zresztą kopia rys. 5.4, gdzie opisy te są już zamieszczone)
- na str. 7 pada stwierdzenie „... certainly not with the Gaussian one”, które nie jest uzasadnione; dla przejrzystości pracy dobrze byłoby np. zamieścić typowe wykresy jak na str. 8 dla rozkładu normalnego
- na str. 17 w odniesieniu do wzoru (4.2) opisany jest operator *std()*, który nie jest w nim użyty
- na str. 72 Autor proponuje podzielić dane na trzy typy, ale opisuje tylko dwa pierwsze z nich

Uważam też, że praca zyskałaby na stylistycznej korekcie językowej. Zdania są bardzo krótkie, z licznymi błędami stylistycznymi. Ponadto użycie rodzajników jest często niepoprawne. Szkoda, że Autor nie znalazł więcej czasu na korektę błędów, których można było łatwo uniknąć, a które poprawiłyby odbiór całości pracy.

4. Główne osiągnięcia rozprawy

Uważam, że najważniejszymi osiągnięciami rozprawy jest zaproponowanie nowych metod do wykrywania uszkodzeń maszyn górniczych w obecności szumu o charakterze niegaussowskim. Na osiągnięcie to składają się następujące elementy:

- zastosowanie zaawansowanych metod analizy statystycznej
- zaproponowanie nowych statystyk do selekcji optymalnego pasma informacyjnego sygnału
- zastosowanie zaawansowanych metod stochastycznych do detekcji składowych o charakterze impulsowym
- zastosowanie nowych miar rozkładów w celu wykrywania cykliczności w rozkładach czasowo-częstotliwościowych
- zaproponowanie nowych metod konstrukcji filtrów, na podstawie modelowania niegaussowskich rozkładów prawdopodobieństwa
- zaproponowanie nowych metod wykorzystujących miary odległości pomiędzy rozkładami prawdopodobieństwa
- opracowanie modeli sygnałów symulowanych, oddających zasadnicze problemy spotykane w maszynach górniczych
- weryfikacja zaproponowanych metod na sygnałach symulowanych i na obiektach rzeczywistych

5. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr Grzegorza Żaka poświęcona metodom wykrywania uszkodzeń lokalnych w obecności szumu o charakterze nie-gaussowskim stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Uważam, że rozprawa zasługuje na ocenę bardzo pozytywną, a opisany sposób rozwiązania problemu naukowego jest poprawny. Rozprawa prezentuje wysoki poziom, a wyniki zostały prawidłowo zweryfikowane. Na szczególne podkreślenie zasługuje bardzo szeroki zakres zaprezentowanych metod. Potwierdzeniem wartości wyników otrzymanych przez Doktoranta jest lista publikacji i wystąpień konferencyjnych, gdzie były one prezentowane.

Po zapoznaniu się z rozprawą stwierdzam, że Autor wykazał się dobrą znajomością dziedziny wiedzy z zakresu górnictwa, diagnostyki technicznej, przetwarzania sygnałów oraz analizy statystycznej. Rozprawa dotyczy więc dyscypliny naukowej górnictwo i geologia inżynierska, chociaż konieczne było też wykazanie się przez Doktoranta wiedzą z innych dziedzin.

Uważam, że zalety merytoryczne rozprawy zdecydowanie przeważają nad nielicznymi występującymi w niej błędami edytorskimi. Uważam także, że Autor prawidłowo sformułował zadanie naukowe i rozwiązał je.

W związku tym stwierdzam, że rozprawa mgr Grzegorza Żaka pt. „**Local damage detection methods in mining machines in the presence of non-Gaussian noise**” („**Metody detekcji uszkodzeń lokalnych w maszynach górniczych w obecności niegaussowskich zakłóceń**”) spełnia ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i stawiam wniosek o jej dopuszczenie do publicznej obrony. Dodatkowo, z uwagi na bardzo szeroki zakres pracy oraz na bardzo dobrą jakość osiągniętych wyników wnioskuję o wyróżnienie pracy.



dr hab. inż. Tomasz Barszcz, prof. nadzw. AGH

Katedra Robotyki i Mechatroniki
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Akademia Górniczo Hutnicza im. St. Staszica
Al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków