

dr hab. inż. Andrzej Jardzioch, prof. ZUT

Szczecin 16.09.2024

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki

70-310 Szczecin

Al. Piastów 19

RECENZJA**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Kiljana****pt. „Metoda określania systemu identyfikacji węgiel-skała”**

Podstawa opracowania recenzji: Uchwała z dnia 10 lipca 2024 roku Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej o powołaniu na recenzenta pracy doktorskiej mgr. inż. Piotra Kiljana. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Krzysztof Kalinowski, prof. PŚ.

1. Ocena wyboru tematu rozprawy

Przedmiotem opiniowanej rozprawy jest opracowanie oryginalnej metody rozpoznawania pokładów węgla na podstawie sygnałów dźwiękowych występujących w trakcie urabiania w ścianie wydobywczej kopalni. Proponowana metoda dedykowana jest dla kopalni węgla kamiennego i może przyczynić się do zwiększenia stopnia automatyzacji procesu pozyskiwania węgla za pomocą kombajnów węglowych.

Doktorant postawił sobie cztery bardzo trudne zadania: dobór i przygotowanie odpowiedniej aparatury pomiarowej do warunków panujących w miejscu rejestracji dźwięku, dobór metody określania charakterystycznych cech zarejestrowanych próbek dźwiękowych, wykorzystanie wybranych metod klasyfikacji umożliwiających rozpoznawanie warstw węgla i innych skał oraz zastosowanie analizy statystycznej Chi-kwadrat Pearsona do zbadania zależności pomiędzy dwoma próbkami zarejestrowanych danych dźwiękowych.

Temat pracy jest bardzo aktualny i poruszany w pracach badawczych wielu ośrodków naukowych na świecie. Obejmuje on bardzo ważne z naukowego i praktycznego punktu widzenia zagadnienie analizy sygnałów niestacjonarnych w dziedzinie częstotliwości, analizy opartej na przekształceniu falkowym, rozpoznawania obrazów oraz zastosowań metod sztucznej inteligencji. Cechą szczególną pracy jest jej zorientowanie na problemy praktyczne

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 18.09.2024
RD JM 512.4. 2024
nr zał.

związane ze zwiększeniem efektywności procesu wydobywania węgla kamiennego. Praca ukierunkowana jest na zwiększenie stopnia automatyzacji pracy kombajnu ścianowego poprzez wyposażenie go w system sterujący zdolny do zmiany kierunku pracy wraz ze zmianą kierunku pokładu węgla w ścianie wydobywczej. Zbudowanie takiego systemu pozwoliłoby na zwiększenie wydajności kombajnu węglowego, zmniejszyłoby jego awaryjność i pozwoliłoby na zwiększenie konkurencyjności polskiego przemysłu węglowego.

Oceniając wybór tematu rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Kiljana należy stwierdzić, że jest on trafny i uzasadniony zarówno pod względem poznawczym jak i aplikacyjnym.

2. Charakterystyka i ocena rozprawy

Przedstawiona do opinii rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Kiljana składa się ze spisu ważniejszych oznaczeń, rysunków i tabel, wstępu, rozdziału, w którym zdefiniowano cel i zakres pracy doktorskiej, opisu metod nieparametrycznej analizy sygnałów, przeglądu metod rozpoznawania granicy warstw węgla i innych skał, opisu metod klasyfikacji i normalizacji danych oraz opisu badań przeprowadzonych w ramach pracy doktorskiej. W zakończeniu autor, na podstawie uzyskanych wyników, zdefiniował wnioski oraz określił kierunki dalszych badań. W ramach pracy znajduje się też obszerna, bo licząca aż 120 pozycji bibliografia, a także dwa załączniki z opracowaną bazą danych w programie MS Excel zapisaną w postaci pliku csv oraz baza danych wykorzystywana w programie WEKA.

Cel pracy został sformułowany prawidłowo. Autor wskazał, iż głównym celem pracy jest opracowanie metody rozpoznawania warstw węgla i skały na podstawie rejestracji dźwięku powstającego w trakcie pracy kombajnu węglowego. W ramach rozdziału trzeciego przedstawiono charakterystyczne cechy pokładów węgla występujących w kopalniach węgla kamiennego w Polsce. Na tym tle należy stwierdzić, iż występowanie geologicznych zaburzeń w pokładzie węgla jest ważną przesłanką determinującą konieczność opracowania automatycznego systemu eksploatacji pokładów węgla kamiennego. W ramach rozdziału czwartego Autor dokonał przeglądu nieparametrycznych metod analizy sygnałów. Szczegółowo omówiono metody analizy sygnałów w dziedzinie amplitudy, czasu i częstotliwości. W sposób wyczerpujący opisano możliwości zastosowania krótkookresowej transformaty Fouriera (STFT) poprzez podział sygnału niestacjonarnego na krótkie segmenty czasowe (okna czasowe) i stosowanie klasycznej transformaty Fouriera dla każdego segmentu. W podrozdziale 4.3.2 doktorant przedstawił przykłady zastosowania przekształcenia falkowego

(Wavelet Transform) do rozpoznawania urabiania warstwy węgla i innych skał. Bazując na informacjach zawartych w literaturze zaprezentowano skalogram (rys. 8) prezentujący występowanie dwóch sygnałów o różnej częstotliwości oraz o różnym czasie trwania. Niestety w tym przypadku zabrakło krytycznej analizy prezentowanego przeglądu literatury. Nie wiadomo, czy zdaniem doktoranta zastosowanie przekształcenia falkowego pozwala na efektywne sterowanie kombajnem ścianowym, czy też metoda ta nie jest najlepsza w tym zastosowaniu. W ramach rozdziału piątego opisano metody klasyfikacyjne stosowane do rozpoznawania granicy między warstwą węgla i innych skał. Opisano metodę wizyjną, metodę wykorzystującą georadar oraz metodę bazującą na występowaniu naturalnego promieniowania gamma w różnych typach skał. Dużo uwagi poświęcono metodzie wykorzystującej wibracje. Ponieważ podczas pracy kombajnu ścianowego generowane są drgania zależne od wytrzymałości na ściskanie frezowanych skał, autor wskazał na możliwość wykorzystania czujników drgań do wykrywania granicy węgla i innej skały. Na podstawie analizy literatury zauważono, iż najczęściej czujniki drgań montowane są na głowicy urabiającej kombajnu lub na obudowie.

W ramach rozdziału szóstego opisano wybrane metody klasyfikacji danych. Zaprezentowano algorytm k najbliższych sąsiadów, algorytm maszyny wektorów nośnych (SVM), metodę lasu losowego (Random Forest) oraz sztuczne sieci neuronowe. Ostatnim rozdziałem, który można zakwalifikować do przeglądu literatury jest rozdział siódmy, w ramach którego opisano stosowane metody normalizacji danych. Zdefiniowano metodę odchylenia od wartości minimalnej oraz metodę normalizacji względem standardowego odchylenia średniokwadratowego.

W ramach rozdziału ósmego opisano badania przeprowadzone w trakcie realizacji pracy doktorskiej. Na rys. 16 przedstawiono szczegółowy plan badań wraz z wyznaczeniem czterech głównych etapów: etapu pozyskiwania danych, etapu ekstrakcji cech, etapu klasyfikacji danych oraz etapu analizy statystycznej. Sformułowano tezę pracy „Na podstawie wybranych metod klasyfikacji: k-najbliższych sąsiadów (k-NN), maszyny wektorów nośnych (SVM), lasu losowego (Random Forest), perceptron wielowarstwowy (MLP), możliwe jest rozróżnienie dźwięku urabiania węgla lub skały”. Należy stwierdzić, iż zarówno zdefiniowany problem badawczy jak i zaproponowana teza są prawidłowe. Doktorant jednoznacznie wskazał, iż prace badawcze prowadzone będą z wykorzystaniem kombajnu ścianowego w wyrobisku ścianowym nr 207, a do pozyskania danych dźwiękowych zastosowany zostanie mikrofon kierunkowy Synco D-1 oraz rejestrator ZOOM H5. Koncepcja prowadzonych badań jest prawidłowa. Autor

uwzględnił specyficzne warunki pracy kombajnu ścianowego w środowisku zbliżonym do rzeczywistego. Ze względu na trudne warunki pracy i możliwość uszkodzenia mikrofonu konieczne było odsunięcie miejsca zamocowania mikrofonu od tarczy frezującej. Ponieważ w ścianie, w której dokonywano rejestracji dźwięku nie występowały zaburzenia geologiczne, w których mogłaby występować duża ilość piaskowca, zdecydowano się na rejestrację próbek dźwiękowych podczas urabiania mułowca w spągu wyrobiska. Do wstępnej oceny uzyskanych próbek dźwiękowych zastosowano analizę STFT (Short-time Fourier transform). Przeprowadzono badania związane z doбором rozdzielczości czasowej i częstotliwości. Na rys. 26 przedstawiono wykres kaskadowy, na którym można zaobserwować zbyt wąskie okno czasowe i związane z tym wyraźne utracenie informacji o wielkości amplitud dla poszczególnych częstotliwości. Autor prawidłowo zauważył, że zastosowanie szerszego okna w domenie czasowej zapewnia wyższą szczegółowość wykresu w dziedzinie częstotliwości, co pozwala na bardziej precyzyjne klasyfikowanie poszczególnych warstw skalnych. Przeprowadzono też badania związane z wpływem typu okna czasowego na proces filtrowania sygnału wejściowego. Badaniom poddano okno prostokątne, trójkątne, Hamminga, Blackmana, Gaussa oraz Hanninga (rys. 29). Spektrogramy na rys. 32 i 33 prezentują próbki dźwięku po analizie STFT w dziedzinie czas-częstotliwość, a na rys. 34 przedstawiono wykres średnich amplitud dla poszczególnych częstotliwości. Największe zróżnicowanie amplitud dla próbek węgla i innych skał można zaobserwować w przedziale częstotliwości od 35 Hz do 70 Hz. Dane uzyskane z transformacji STFT wykorzystano do klasyfikacji danych za pomocą algorytmu k-najbliższych sąsiadów (k-NN) oraz za pomocą klasyfikatora opartego na maszynie wektorów nośnych (Support Vector Machine). Zastosowanie tych dwóch metod należy uznać za właściwe rozwiązanie zdefiniowanego problemu badawczego. Zarówno algorytm k-NN jak i klasyfikator SVM stosowane są do rozwiązywania problemów klasyfikacji oraz regresji, przy czym klasyfikator SVM próbuje znaleźć specyficzny hiperplan (prostą dla zbioru dwuwymiarowego), który najlepiej rozdziela dane na różne klasy. Następnie autor przedstawił wyniki zastosowania klasyfikacji z zastosowaniem metody lasu losowego (Random Forest) oraz przy użyciu sztucznej sieci neuronowej (Multilayer Perceptron). Metoda lasu losowego pozwoliła na klasyfikację badanych próbek z precyzją na poziomie 83% przy współczynniku Kappa Cohena równym 0,60. Badania z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej przeprowadzono dla różnej liczby warstw oraz różnej liczby neuronów w każdej warstwie. Zbadano też wpływ normalizacji danych uczących na efektywność działania sztucznej sieci neuronowej. Przy zastosowaniu normalizacji uzyskano dokładność klasyfikacji na poziomie

64,47% (współczynnik Kappa Cohena równy 0,00), a w przypadku braku normalizacji na poziomie 79,32% przy współczynniku Kappa Cohena równym 0,56. Otrzymane wyniki świadczą o stosunkowo dobrej dokładności klasyfikacji i średniej zgodności między dwoma klasyfikatorami (w przypadku danych nienormalizowanych).

W ramach rozdziału dziewiątego autor zastosował analizę statystyczną Chi -kwadrat Pearsona do badania zależności między danymi uzyskanymi podczas frezowania węgla kamiennego oraz podczas frezowania skały. Hipoteza zerowa zakładała, że nie istnieje istotny statystycznie związek pomiędzy badanymi zmiennymi, natomiast hipoteza alternatywna zakładała związek statystycznie istotny. Przeprowadzone obliczenia pozwoliły odrzucić hipotezę alternatywną i przyjęcie hipotezy zerowej potwierdzającej brak istnienia istotnej zależności statystycznej pomiędzy sygnałami pochodzącymi z frezowania skały i frezowania węgla kamiennego.

W końcowej części pracy autor zawarł wnioski z przeprowadzonych badań oraz wskazał pomysły na przyszłe prace badawcze. Wskazano, iż dane dźwiękowe uzyskiwane w trakcie pracy kombajnu ścianowego mogą zostać wykorzystane do rozpoznawania rodzaju frezowanego materiału. Zaproponowano też zastosowanie metod hybrydowych z wykorzystaniem dwóch różnych typów czujników.

Jako najważniejsze wyniki uzyskane w ramach pracy można wskazać opracowanie metody pozwalającej na wykrywanie różnic w dźwięku powstającym przy frezowaniu skały i węgla przez kombajn ścianowy. Analiza STFT próbek dźwiękowych wykazała, iż podczas frezowania skał można zauważyć charakterystyczne zakresy częstotliwości, przy których amplituda drgań jest wyraźnie wyższa (zakres 35-70 Hz). Najlepsze wyniki klasyfikacji próbek dźwiękowych uzyskano przy wykorzystaniu metody Maszyny Wektorów Nośnych (83%). Bardzo dobre wyniki (82,80%) uzyskano też za pomocą klasyfikacji z wykorzystaniem lasu losowego (Random Forest) (82,80%) oraz metody k-najbliższych sąsiadów (80%). Zastosowanie sztucznej sieci neuronowej pozwoliło rozróżnić rodzaj frezowanej skały w 79% przypadków. Przeprowadzone badania pozwoliły potwierdzić zasadność hipotezy zerowej o braku statystycznie istotnego związku między sygnałem powstającym przy frezowaniu skały i sygnałem powstającym przy frezowaniu węgla. Stwierdzono, iż łatwość montażu mikrofonu kierunkowego oraz niski koszt aparatury pomiarowej pozwala na szybkie praktyczne wykorzystanie tej metody identyfikacji.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Do uwag dyskusyjnych i krytycznych zaliczyłbym:

1. Problem badawczy został określony prawidłowo, lecz niezbyt precyzyjnie. Z treści pracy wynika, iż doktorant zamierza opracować system pozwalający na wykrycie na podstawie sygnału dźwiękowego, czy kombajn ścienny urabia węgiel kamienny czy też skałę. Wyjaśnienia wymaga jednak zapis celu pracy zamieszczony na stronie 13 „Głównym celem pracy jest opracowanie **metody określania systemu rozpoznawania** węgla i skały na podstawie rejestrowanego dźwięku urabiania ...”. Co oznacza sformułowanie „metody określania systemu rozpoznawania”?
2. Czasami doktorant nie formułuje swoich myśli precyzyjnie. Prezentując zakres pracy doktorant napisał „W etapie czwartym wykorzystano analizę statystyczną Chi-kwadrat Pearsona w celu zbadania zależności pomiędzy dwoma próbkami węgla i skały” (str. 13). Takie sformułowanie może prowadzić do mylnego wniosku, iż doktorant zamierza badać próbki węgla i innych skał (a w rzeczywistości chodzi o próbki dźwięku powstające podczas frezowania węgla i innych skał). W tym miejscu chciałbym zwrócić uwagę, iż węgiel też jest uważany za skałę, a konkretnie za skałę osadową.
3. Przegląd literatury związany jest głównie z prezentacją różnych metod analizy sygnałów, natomiast zauważalny jest brak podsumowania i wniosków z przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu. Na rys. 9 doktorant przedstawił kilkanaście różnych typów sztucznych sieci neuronowych (sieci jednokierunkowe, rekurencyjne, Bayesa, modułarne, specjalne). Zabrakło jednak informacji o potencjalnych możliwościach zastosowania tych różnych typów sieci do rozwiązania zdefiniowanego w pracy problemu badawczego. W tym miejscu można też postawić pytanie, dlaczego do klasyfikacji zastosowano typową sieć wielowarstwową, a nie np. splotową sieć neuronową. Brak jest też precyzyjnego wyjaśnienia, dlaczego w celu rozwiązania postawionego problemu badawczego zdecydowano się na wykorzystanie tylko sygnału dźwiękowego mimo, iż w przeglądzie literatury zawarto informacje, że badacze w tym celu wykorzystują czujniki termowizyjne, kamery optyczne, czujniki promieniowania gamma, czujniki drgań oraz lasery.
4. Głównym zadaniem doktoranta było opracowanie metody badawczej pozwalającej na identyfikację cech sygnału zarejestrowanego dźwięku podczas urabiania węgla i skały. W tym celu zdefiniowano 9 etapów, które przedstawiono na rys. 16. Nie wyjaśniono, istotności etapu nr 6 (Wyodrębnianie danych z STFT do bazy danych programu WEKA). Proponowana metoda powinna cechować się pewnym stopniem ogólności a

przeniesienie danych z jednego oprogramowania (Matlab) do innego (Weka) ma czysto techniczny wymiar.

5. Istotnym elementem proponowanej metody jest etap 9 „Analiza statystyczna Chi-kwadrat”. W ramach tego etapu przeprowadzony został test niezależności zbiorów sygnałów. W przypadku sygnałów badanych w ramach pracy doktorskiej wartość chi kwadrat wynosiła 20,7 przy poziomie ufności 0,05 i liczbie stopni swobody 43. Pozwoliło to na stwierdzenie, że nie wykryto statystycznie istotnej zależności między analizowanymi zmiennymi. W opracowaniu brak jest informacji, co należy zrobić, gdy wartości te będą inne i będą podstawy do odrzucenia hipotezy zerowej.

4. Końcowa ocena rozprawy

Końcowa ocena rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Kiljana jest pozytywna. Autor wykazał się teoretyczną i praktyczną wiedzą z zakresu inżynierii mechanicznej, a w szczególności z zakresu nowoczesnej analizy danych i uczenia maszynowego. Zastosowana krótkoczasowa transformata Fouriera STFT zebranych próbek dźwiękowych wykazała, że uzyskane próbki dźwiękowe różnią się znacząco w przypadku frezowania węgla i w przypadku frezowania innych skał zarówno w zakresie częstotliwości, jak i amplitudy. Zaletą proponowanej metody pozyskiwania próbek dźwiękowych jest łatwość montażu mikrofonu kierunkowego. Przeprowadzony w ramach pracy test Chi-kwadrat potwierdził zasadność hipotezy zerowej o nieistnieniu istotnego statystycznie związku między sygnałem dźwiękowym powstającym przy urobku węgla i przy urobku innej skały. Wniosek ten wskazuje na możliwość budowy systemu sterowania opartego na tych sygnałach.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Kiljana stanowi oryginalną pracę, mieszczącą się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i w pełni spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim, zawarte w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Wnoszę zatem o przyjęcie przedłożonej rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Szczecin 16.09.2024

Dr hab. inż. Andrzej Jarczoch, prof. ZUT

/podpis odręczny/

*wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)