

dr hab. inż. Grzegorz Klekot, prof. uczelni, dr hab. inż. Marcin Staniek, prof. PS, Warszawa, 28.08.2023 r.

Politechnika Warszawska

Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Słowińskiego pt. „Identyfikacja poruszającego się pojazdu na podstawie sygnałów wibroakustycznych”

Podstawy formalne opracowania recenzji:

Recenzję pracy doktorskiej mgr. inż. Pawła Słowińskiego opracowano zgodnie z uchwałą nr 50/2023 Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Śląskiej z dnia 29 czerwca 2023 roku.

1. Uwagi o wyborze tematyki pracy

Powszechnie wiadomo, że sygnał wibroakustyczny niesie szereg informacji użytecznych do wnioskowania o stanie technicznym maszyn, a obiekty różnych klas traktowane jako źródła dźwięku można rozróżniać na podstawie struktury częstotliwościowej ich sygnałów akustycznych. Jednak w przypadku ogólnym, gdy obiekty poruszają się z różnymi prędkościami, trudno je jednoznacznie kwalifikować przez proste porównanie zmierzonych widm.

Badania nad metodyką wykorzystania sygnałów wibroakustycznych do identyfikacji obiektów w ruchu niewątpliwie wpisują się w szeroko rozumiane działania służące poprawie bezpieczeństwa systemów transportowych, a doskonalenie stosownych narzędzi badawczych stanowi swoiste wyzwanie stawiane inżynierowi przez świat

współczesny. W szczególności jest nim rozwijanie algorytmów klasyfikacyjnych do identyfikacji różnych typów taboru kolejowego.

Biorąc pod uwagę powyższe uważam, że tematyka pracy jest aktualna, a badania nad wykorzystaniem sygnałów wibroakustycznych do identyfikacji poruszających się pojazdów mają istotne znaczenie naukowe i użyteczne.

2. Charakterystyka pracy

Przedstawiona do oceny praca liczy 181 stron. Główna część merytoryczna zawiera 158 stron tekstu łącznie z rysunkami i tabelami; resztę stanowią: licząca 153 pozycje bibliografia, strona tytułowa, spis treści, streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz oznaczeń oraz spis ilustracji i spis tabel.

We wstępie Autor przedstawia powody podjęcia badań nad wykorzystaniem sygnałów wibroakustycznych do identyfikacji poruszających się pojazdów, formułuje cel rozprawy, oraz wymienia przewidywane do zastosowania metody.

Pierwsze trzy rozdziały opracowano na podstawie informacji literaturowych. Zaprezentowano obecnie stosowane metody identyfikacji poruszających się pojazdów transportu drogowego i szynowego (rozdział 1), przedyskutowano wybrane aspekty aktywności wibroakustycznej taboru kolejowego (rozdział 2), omówiono konstrukcję torowisk ze wskazaniem roli poszczególnych elementów, oraz spotykane w Polsce rodzaje pociągów i lokomotyw (rozdział 3).

W rozdziale czwartym sformułowano tezę i wskazano cel rozprawy.

Kolejne rozdziały prezentują badania wykonane przez Doktoranta, wyniki tych badań i osiągnięte rezultaty. Piąty rozdział zawiera opis planowania i realizacji eksperymentów wraz z uzasadnieniem zastosowanej strategii badawczej; omówiono również wyposażenie pomiarowe oraz miejsca i czas rejestracji plenerowych.

Przykładowe wyniki badań przedstawiono i omówiono w rozdziale szóstym, siódmy rozdział poświęcono wpływowi efektu Dopplera na strukturę dźwięku w punkcie pomiarowym.

Kluczowe znaczenie dla realizacji celu rozprawy mają rozważania zawarte w ósmym rozdziale. Zaprezentowano tu rezultaty analiz zarejestrowanych sygnałów wibroakustycznych oraz opracowaną koncepcję algorytmu klasyfikującego składy

kolejowe. Omówiono również działania zrealizowane dla potwierdzenia możliwości stosowania zaproponowanej metodyki do identyfikacji pojazdów szynowych.

Podsumowanie uzyskanych efektów zrealizowanych badań Autor przedstawił w ostatnim, dziewiątym rozdziale. Poprzez opracowanie i weryfikację w warunkach rzeczywistych metody klasyfikacji pojazdów szynowych zrealizował główny cel pracy, a uzyskana skuteczność identyfikacji na podstawie zarejestrowanych sygnałów wibroakustycznych potwierdza tezę pracy i celowość kontynuacji badań służących doskonaleniu algorytmów identyfikacyjnych.

3. Ocena pracy

Przedstawiony przegląd literaturowy jest opracowany poprawnie. Odzwierciedla on aktualny stan wiedzy, nawiązuje do wielu obszarów wcześniejszych badań związanych z problematyką rozprawy prowadzonych w ośrodkach zagranicznych i krajowych. Stosunkowo niewiele pozycji literaturowych dotyczy bezpośrednio wykorzystania sygnałów wibroakustycznych do identyfikacji obiektów technicznych, kilka materiałów wymienionych w spisie (pozycje 28, 47, 70, 78, 114, 132) nie zostało powołanych w treści rozprawy, zaś powoływane prace dwóch autorów (Antoni i Randall, strona 54) pominięto w bibliografii. Niemniej uważam, że wybór literatury przedstawiony przez Autora jest generalnie trafny, a sposób cytowania poprawny, co świadczy o umiejętności posługiwania się materiałem bibliograficznym.

Przegląd stosowanych w transporcie lądowym metod identyfikacji pojazdów poparty analizą czynników wpływających na drgania i hałas taboru kolejowego wraz z hipotezą o dużej zawartości informacyjnej rejestrowanych synchronicznie sygnałów drganiowych i akustycznych umożliwiły sformułowanie tezy „istnieje możliwość rozpoznania rodzaju przejeżdżającego pojazdu szynowego na podstawie analizy obrazów sygnałów wibroakustycznych” bezpośrednio związanej z celem rozprawy „opracowanie metody identyfikacji rodzaju przejeżdżającego pojazdu szynowego przy wykorzystaniu sygnałów drganiowych i akustycznych”.

Dla osiągnięcia postawionego celu Doktorant zaplanował i zrealizował eksperymenty w warunkach rzeczywistych, uzyskując bazę synchronicznie zarejestrowanych podczas przejazdów różnych pojazdów szynowych sygnałów przyspieszeń drgań szyny oraz ciśnienia akustycznego obok torowiska. **Wysoko oceniam działania**

służące doborowi właściwej konfiguracji aparatury pomiarowej oraz stronę warsztatową badań plenerowych.

Zarejestrowane sygnały zostały przetworzone numerycznie, a przykładowe przebiegi czasowe i widma uzyskane metodą szybkiej transformaty Fouriera (FFT) przedstawiono na rysunkach. Interesującym aspektem są rozważania nad wpływem efektu Dopplera na strukturę częstotliwościową hałasu w punkcie pomiarowym.

Po zweryfikowaniu niewielkiej skuteczności rozpoznawania pojazdów na podstawie dwóch podstawowych deskryptorów (wartości skutecznej i wartości szczyt-szczyt) Doktorant zaproponował wykorzystanie transformat falkowych do dekompozycji sygnałów wibroakustycznych pozwalającej wyodrębnić informacje użyteczne przy rozwiązywaniu postawionego zadania.

Bazując na wynikach kompleksowych analiz z wykorzystaniem czterech rodzajów falek przy ośmiu poziomach dekompozycji Doktorant sformułował warunki, które są spełnione przez sygnały zarejestrowane podczas przejazdu pojazdów szynowych należących do różnych grup i opracował algorytm postępowania podczas klasyfikacji składów kolejowych. Algorytm ten stanowi podstawę koncepcji metody wibroakustycznej identyfikacji pojazdów szynowych z użyciem transformaty falkowej. Skuteczność metody potwierdzono z wykorzystaniem 10 losowo wybranych synchronicznych rejestracji drgań i ciśnienia akustycznego uzyskując poprawność kwalifikacji na poziomie 70 lub 80% (w zależności od użytej falki).

Praca została zakończona poprawnym podsumowaniem i wskazaniem kierunków dalszych badań; zaakcentowano potencjał aplikacyjny opracowanej metodyki.

Całość działań przedstawionych w pracy oceniam pozytywnie pod względem merytorycznym i metodycznym. Autor poprawnie zaplanował i przeprowadził cykl eksperymentów plenerowych, właściwie zrealizował przetwarzanie numeryczne sygnałów wibroakustycznych prowadzące do osiągnięcia celu pracy oraz stworzył narzędzie pozwalające z dobrą skutecznością klasyfikować składy kolejowe do konkretnych grup na podstawie drgań szyny i hałasu w sąsiedztwie torowiska rejestrowanych podczas przejazdu różnych pojazdów szynowych.

4. Szczegółowe uwagi krytyczne

W trakcie czytania pracy nasuwają się następujące uwagi i pytania:

- Do czego służy „stal magnetyczna” pokazana jako blok funkcjonalny na schematach z rysunków 9 i 10?
- Czym jest precyzja częstotliwościowa widma na rysunku 16?
- Jaki jest sens fizyczny parametrów wykorzystanych przy wizualizacji grupowania cech skalarnych (rysunek 17)?
- Jak Autor rozumie minimalną częstotliwość próbkowania akcelerometrów, jakie uzasadnienie ma wartość 4 kHz (strona 31)?
- Czy odkształcenia sprężyste i związany z nimi poślizg na styku koło-szyna mają znaczenie dla generacji dźwięku (rysunek 19); jeśli tak – to jakie?
- Co przedstawia faktycznie rysunek 22? Czy jest to rozkład wartości amplitud składowej 1250 Hz na powierzchni bocznej wagonu napędowego pociągu TGV? Analogiczne pytania dotyczą rysunków 23, 24, 25.
- Opis pod rysunkiem 26 błędnie odwołuje się do lewej i prawej strony, choć wykresy umieszczono powyżej wizualizacji połączenia wagonów. Czy rzeczywiście na wykresach przedstawiono poziom natężenia dźwięku (wektor), czy też poziom ciśnienia akustycznego?
- Tabela 4 zawiera informacje o średnich poziomach ciśnienia akustycznego poruszających się składów ze względu na typ hamulca. Czy opisane w pozycji [66] pomiary wykonano podczas hamowania pociągów?
- Trudny do zrozumienia jest opis badań przedstawiony na podstawie artykułu [108]. Jak na przykład należy rozumieć „odczyty parametrów gruntu wykonane za pomocą pomiarów sejsmicznych” (strona 46)? Nazwy czterech parametrów w tabeli 3 nie korespondują z rysunkiem 30.
- Czym jest wspomniany na stronie 51 „drganiowy system zapadkowy”?
- Na czym polega „zmniejszenie potrzeby wysokiej częstotliwości próbkowania” przy „przesyłaniu cyfrowych danych drgań” (strona 51)?
- Sformułowanie „Z tego względu transformata Fouriera jest skuteczna jedynie dla sygnałów periodycznych, regularnych i stacjonarnych” wymaga szerszej dyskusji wobec możliwości analizowania widm chwilowych w funkcji czasu.
- Uproszczeniem jest zdefiniowanie energii sygnału wzorem (12) – całka kwadratu amplitudy jest wprost proporcjonalna do energii sygnału zmiennego w czasie, lecz tylko w szczególnych przypadkach ma wymiar energii.

- Możliwości wykorzystania przekształcenia Fouriera do zmiany dziedziny sygnału (strona 53) omówiono dość lakonicznie, zwraca uwagę brak konsekwencji oznaczenia indeksów dolnych w zależności (14).
- Niewłaściwie dla zilustrowania zjawiska „rozmycia” widma (ang. „aliasing”) dobrano przykład sygnału na rysunku 39. Prostokątne okno czasowe o długości 0,2 sekundy nie powoduje nieciągłości podczas fragmentowania przebiegu – a w takiej sytuacji nie mamy do czynienia z „rozmyciem”.
- Czy celowo na rysunku 41 pominięto „rodzaj szyny i stan łączenia” przy prezentacji czynników wpływających na hałas pojazdów szynowych?
- Czy „System pomiarowy nie powinien wpływać na bezpieczeństwo ruchu kolejowego” (rys. 45)? Czy też może nie powinien wpływać negatywnie?
- Zwraca uwagę pewna niekonsekwencja harmonogramu badań: z tabel 12 i 13 wynika, że pierwszą serię pomiarów docelowych poprzedziła pomiary próbne.
- Wątpliwości budzi adekwatność podpisu pod rysunkiem 55, na którym zaprezentowano widma przyspieszeń drgań fragmentu szyny pobudzonej młotkiem udarowym na stanowisku badawczym. Czy nie pomyłono jednostek osi pionowej gęstości widmowej sygnału młotka?
- Brak skali kolorystycznej utrudnia interpretację spektrogramów z rysunku 61.
- Na czym polega narzędzie „analizę statystyczną składy kolejowe” (ostatni akapit na stronie 103)?
- Opis realizacji badań plenerowych i przetwarzania sygnałów pomija kwestie zachowania spójności pomiarowej oraz niepewności pomiarów. Jak zrealizowano dobrą praktykę laboratoryjną w tym obszarze?

5. Uwagi o stronie edytorskiej rozprawy

Praca pod względem edytorskim nie została opracowana zbyt starannie, zwracając uwagę błędy „literowe”. Poniżej kilka przykładów pomyłek nie wyeliminowanych podczas prac redakcyjnych.

- W tekście streszczenia nieprawidłowo powołano numerację rozdziałów (6-9 zamiast 5-8);
- Strona 10, pierwszy wiersz - „na rysunku 1” zamiast „w tabeli 1”;
- Strona 53, czwarty wiersz - powtórka sekwencji słów „które są wystarczająco”;

- Rysunek 36 na stronie 54 - w podpisie „kurogramu” zamiast „kurtogramu”; wątpliwości budzi sens prezentacji kurtogramów przy częstotliwościach ograniczonych do przedziału od 0 do 0,5 Hz;
- Strona 62, drugi wiersz - „kluczowy” zamiast „kluczowa”;
- Strona 64, pierwszy wiersz - „znaczenie w” zamiast „znaczenie dla”;
- Strona 68, tabela 6: niewłaściwie podano jedną ze standardowych długości szyny UIC 60 (powinno być 12 metrów zamiast 120 metrów);
- Strona 68, ostatni wiersz – błędnie powołano rysunek 45 zamiast 44;
- Strona 81, pierwszy akapit punktu 5.1 – błędnie powołano rysunki (48-53 zamiast 46-51);
- Strona 92, pierwszy akapit – błędne powołanie numeru tabeli (14 zamiast 15);
- Strona 105, pierwszy wiersz – brak ostatniej litery w słowie „analizowana”; ostatni wiersz - błędne powołanie numeru rysunku (68 zamiast 67);
- Strona 108, trzeci wiersz – zamiast „pomiarów” powinno być „pomiarowy”; szósty wiersz – zamiast „prędkości” powinno być „prędkościach”.

Zasygnalizowane powyżej mankamenty stylistyczne i edytorskie nie komplikują odbioru istoty pracy ani nie zmniejszają jej czytelności.

6. Wnioski końcowe

Wymienione przeze mnie uwagi krytyczne nie obniżają pozytywnej całościowej oceny pracy. Uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa jest wartościowa pod względem poznawczym i użytecznym, zawiera nowatorskie spojrzenie na wykorzystanie informacji zawartych w sygnałach wibroakustycznych do identyfikacji przejeżdżających pojazdów szynowych.

Mgr inż. Paweł Słowiński wykazał się umiejętnością postawienia i samodzielnego rozwiązania problemu naukowego, jakim jest właściwe zaplanowanie cyklu badań eksperymentalnych oraz wykorzystanie rezultatów do poprawnego formułowania wniosków. Tym samym dowiódł, że ma odpowiedni zasób wiedzy teoretycznej i umiejętności praktycznych w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport oraz, że potrafi samodzielnie prowadzić pracę naukową.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana praca doktorska mgr. inż. Pawła Słowińskiego nt. „Identyfikacja poruszającego się pojazdu na podstawie

sygnałów wibroakustycznych” spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim przez ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U.2017 r. poz. 1789) w zw. z art. 179 ust. 1 i ust. 2 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2018 r. poz. 1669 z późn. zm) i może zostać dopuszczona do publicznej obrony.