

RDI TT - mpT. 09.01.2025
M. Kony

Szczecin, 27.12.2024

prof. dr hab. inż. Jacek Piskorowski
Katedra Inżynierii Systemów, Sygnałów i Elektroniki
Wydział Elektryczny
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgra inż. Tomasza Koniora pt.: „Nowe algorytmy przetwarzania, analizy i oceny danych dla niestacjonarnych systemów ważenia pojazdów w ruchu”.

Podstawą formalną opracowania recenzji jest Uchwała nr 47/2024 Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Śląskiej z dnia 29 października 2024 roku w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy doktorskiej mgra inż. Tomasza Koniora, a także pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Śląskiej prof. dra hab. inż. Andrzeja Polańskiego z dnia 27 listopada 2024 roku. Promotorem opiniowanej rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Jacek Izydorezyk.

1. Znaczenie podjętej tematyki

Opiniowana rozprawa doktorska dotyczy systemów ważenia pojazdów w ruchu (WIM ang. *Weigh-in-Motion*). Systemy ważenia w ruchu są podstawowym narzędziem do monitorowania przeciążonych pojazdów w transporcie drogowym. Tego typu systemy pozwalają na szybką i automatyczną selekcję przeciążonych pojazdów, a także dostarczają innych informacji o ruchu drogowym. Przedstawione w rozprawie doktorskiej wyniki badań i prac dotyczą w szczególności algorytmów przetwarzania oraz analizy sygnałów zebranych na stacjach ważenia pojazdów w ruchu. Przeprowadzone przez Doktoranta badania miały przede wszystkim na celu zwiększenie precyzji i wiarygodności systemów ważenia pojazdów w ruchu. Wdrożenie efektywnych i precyzyjnych systemów ważenia pojazdów w ruchu

umożliwi nie tylko bieżące wykrywanie przeciążeń, ale również pozwoli na szybkie wszczynanie procedur administracyjnych, co w efekcie przyczyni się do poprawy stanu infrastruktury drogowej oraz zwiększenia bezpieczeństwa w ruchu drogowym. Doktorant słusznie podkreślił, że pomimo intensywnych kontroli prowadzonych przez Inspekcję Transportu Drogowego (ITD) w Polsce, przeciążone pojazdy nadal stanowią poważny problem. W efekcie istnieje realna potrzeba wprowadzenia precyzyjnych i efektywnych automatycznych systemów pomiaru i inicjowania adekwatnych procedur administracyjnych. Podjęta przez Doktoranta tematyka wpisuje się w zakres dyscypliny *informatyka techniczna i telekomunikacja*. Należy również podkreślić, że tematyka rozprawy doktorskiej jest niezwykle ważna i aktualna zarówno z teoretycznego, jak i praktycznego punktu widzenia.

2. Ogólna charakterystyka, zakres i cel rozprawy

Problematyka badawcza rozprawy doktorskiej dotyczy analizy, przetwarzania oraz oceny danych uzyskanych z niestacjonarnych systemów ważenia pojazdów w ruchu. Doktorant dokonał analizy oraz rozwoju metod przetwarzania sygnałów generowanych przez czujniki tego typu systemów funkcjonujące w różnych warunkach drogowych. Zasadniczą motywacją do podjęcia się badań, których wyniki zamieszczono w rozprawie doktorskiej, jest skuteczna eliminacja przeciążonych pojazdów z ruchu drogowego. Wdrożenie efektywnych i skutecznych systemów monitorowania i eliminacji przeciążeń w transporcie drogowym jest niezwykle istotne w kontekście zachowania integralności i wydłużenia czasu eksploatacji infrastruktury drogowej, a także w kontekście poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego.

Do zasadniczych wyzwań oraz problemów badawczych Doktorant zaliczył przede wszystkim dynamiczny charakter stacji ważenia pojazdów w ruchu. Systemy pomiarowe złożone z takich modułów, jak czujniki wagowe, pętle indukcyjne oraz pozostałe urządzenia zintegrowane z nawierzchnią drogi, mają niestacjonarny charakter, co w efekcie utrudnia ich analizę, a także utrudnia projektowanie algorytmów przetwarzania danych generowanych przez te systemy. Istotnym wyzwaniem technologicznym jest również konieczność implementacji tych systemów jako systemów czasu rzeczywistego, co w efekcie generuje duże wymagania w zakresie szybkości akwizycji, przetwarzania oraz analizy danych. Biorąc pod uwagę przedstawione wyzwania i problemy badawcze oraz wyzwania technologiczne jako główny cel badawczy Doktorant wskazał opracowanie zaawansowanych algorytmów przetwarzania danych, które będą odporne na zmienność warunków eksploatacyjnych,

zapewniając jednocześnie wiarygodność pomiarów w czasie rzeczywistym. Tak postawione cele oraz wyzwania doprowadziły do sformułowania następujących tez rozprawy doktorskiej:

- *Odpowiednio dobrane i zaprojektowane algorytmy przetwarzania sygnałów z czujników mogą znacząco zwiększyć funkcjonalność stacji ważenia pojazdów w ruchu, bez konieczności istotnej rozbudowy infrastruktury fizycznej.*
- *Zastosowanie odpowiednich algorytmów oraz oprogramowania do przetwarzania danych umożliwia uruchomienie stacji ważenia pojazdów w ruchu do celów administracyjnych.*
- *Istnieją algorytmy przetwarzania sygnałów, które zastosowane w przypadku niestacjonarnych systemów ważenia pojazdów w ruchu (WIM) wykazują wysoką odporność na zmieniające się warunki operacyjne i środowiskowe.*

Cele rozprawy doktorskiej zostały osiągnięte poprzez opracowanie oraz dobór algorytmów przetwarzania sygnałów, które zwiększyły funkcjonalność stacji ważenia pojazdów w ruchu. Przedstawione w rozprawie doktorskiej algorytmy, wykorzystujące takie narzędzia oraz techniki, jak analiza czynnikowa, algorytmy uczenia maszynowego oraz regresory oparte na algorytmie losowego lasu, umożliwiły ważenie pojazdów z większą precyzją. Ponadto, zaproponowane algorytmy umożliwiły akwizycję dodatkowych danych i informacji, takich jak estymacja prędkości oraz długości pojazdu. Zaproponowano ponadto klasyfikatory służące m.in. do identyfikacji modelu i marki pojazdu, a także liczby osi. Wyniki badań oraz testów potwierdziły, że wykorzystanie przedstawionych w rozprawie doktorskiej algorytmów oraz oprogramowania do przetwarzania danych może umożliwić wykorzystanie systemów ważenia pojazdów w ruchu do celów administracyjnych. W szczególności algorytm oceny wiarygodności pomiarów (oparty na logice rozmytej) umożliwia w czasie rzeczywistym ocenę poprawności każdego pomiaru, co jest kluczowe w kontekście możliwości wdrożenia systemów WIM i egzekwowania naruszeń przepisów drogowych. Doktorant wykazał, że opracowane w ramach rozprawy algorytmy w poprawny sposób funkcjonowały w różnych warunkach operacyjnych oraz środowiskowych. Testy zostały przeprowadzone na różnych stacjach pomiarowych i różnych pasach ruchu.

Cele oraz tezy pracy zdefiniowano w precyzyjny sposób. Można stwierdzić, że postawione cele pracy są istotne i aktualne na tle obecnego stanu wiedzy w zakresie ważenia pojazdów w ruchu. Cele oraz tezy pracy odpowiadają zakresowi i tematyce rozprawy oraz

determinują zakres przeprowadzonych badań. Uważam, że podjęcie tematu rozprawy doktorskiej było celowe zarówno ze względów poznawczych, teoretycznych oraz praktycznych. Tezy pracy zostały prawidłowo postawione, natomiast cele główne rozprawy doktorskiej zostały zrealizowane.

3. Struktura rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Koniora pt.: „Nowe algorytmy przetwarzania, analizy i oceny danych dla niestacjonarnych systemów ważenia pojazdów w ruchu” ma formę dysertacji i została podzielona na 6 zasadniczych rozdziałów. W rozdziale pierwszym przedstawiono wprowadzenie do rozprawy doktorskiej, które obejmuje opis problematyki poruszanej w rozprawie, sformułowanie problemu badawczego, motywację badawczą, cel pracy, tezy badawcze, wyniki badań i oryginalny wkład Doktoranta, wkład dysertacji w kontekście prac pokrewnych, a także zarys rozprawy.

W rozdziale drugim zamieszczono analizę systemów WIM obejmującą przede wszystkim przegląd powiązanych prac, charakterystykę procesu ważenia pojazdów w ruchu, opis przykładowej aplikacji agregującej dane, opis i analizę wdrożenia systemów HS-WIM-E, charakterystykę typów systemów ważenia pojazdów, analizę komponentów i technologii w systemach WIM, charakterystykę czujników detekcji pojazdów, charakterystykę komputera wagowego, charakterystykę innych źródeł danych, opis algorytmów służących do przetwarzania sygnałów z czujników WIM, opis algorytmów służących do przetwarzania sygnałów z czujników indukcyjnych, opis analizy sygnałów z pętli indukcyjnych, analizę czynnikową wektorów cech, opis klasyfikatorów, regresorów oraz innych algorytmów analizy sygnałów z pętli indukcyjnych, analizę sygnałów z wag, ocenę dokładności ważenia pojazdów w ruchu, opis klasyfikacji pojazdów, opis środowiska operacyjnego oraz platform sprzętowych, a także podsumowanie części teoretycznej.

Rozdział trzeci poświęcony jest eksperymentom oraz procesom wdrożeniowym i obejmuje opis stanowisk badawczych i wdrożeniowych, opis badań dotyczących sygnałów z pętli indukcyjnych, opis badań dotyczących sygnałów z czujników wagowych, a także opis eksploracji profilu magnetycznego pojazdu.

W rozdziale czwartym przedstawiono podsumowanie rozprawy doktorskiej. Rozdział piąty obejmuje opis wykorzystanych danych, w tym danych z pętli indukcyjnych szerokich

z drogi krajowej 44, danych z pętli indukcyjnych szerokich i wąskich z układu akwizycji danych AGH, a także danych RAW z czujników ważenia pojazdów w ruchu. Rozdział szósty obejmuje narzędzia programowe oraz kody. Istotną częścią rozprawy doktorskiej jest bibliografia, która obejmuje 101 pozycji, w tym 8 artykułów, których współautorem jest Doktorant:

- Krzysztof Brzozowski, Andrzej Maczyński, Artur Ryguła, **Tomasz Konior**, A weigh-in-motion system with automatic data reliability estimation, *Measurement* **221** (2023), 113494.
- Aleksander Konior, **Tomasz Konior**, Krzysztof Brzozowski, Andrzej Maczyński, Artur Ryguła, New functionalities of the weigh-in-motion system - iwim solution, *Transport Problems 2022: XIV International Scientific Conference; XI International Symposium of Young Researchers: conference proceedings (Katowice)* (A. Sładkowski, ed.), Silesian University of Technology. Faculty of Transport and Aviation Engineering, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2022, Pamięć CD.
- Aleksander Konior, **Tomasz Konior**, Krzysztof Brzozowski, Andrzej Maczyński, Artur Ryguła, New functionalities of the weigh-in-motion system: iwim solution, *Transport Problems* **18** (2023), Nr 2, 162–170, Accessed: August 29, 2024.
- Aleksander Konior, Paweł Piwowarczyk, **Tomasz Konior**, Artur Ryguła, Assessment of possibilities to distinguish vehicles on the basis of wheel load characteristics, *Transport Systems Telematics (TST 2020)*, Springer, Cham, 2020, 272–284.
- **Tomasz Konior**, Jacek Izydorczyk, Identyfikacja pojazdów w ruchu miejskim, 15–18, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2021.
- **Tomasz Konior**, Jacek Izydorczyk, The possibility of using induction loops as a source of information on vehicles, 96–105, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2023.
- **Tomasz Konior**, Jacek Izydorczyk, Artur Ryguła, Leonardo Guerson, Addressing the reliability challenges of high-speed wim (hs-wim) for direct enforcement, *Technology Convergence 2023: Setting the Wheels In Motion: Reimagining the Future of Heavy Vehicles, Roads and Freight*, Trinity College Dublin, 2023, 1–10.
- A. Ryguła, **T. Konior**, P. Piwowarczyk, Classification method for vehicles with a maximum permissible weight up to 3.5 tonnes, *Archives of Transport System Telematics* **12** (2019), Nr 4, 27–30.

4. Ogólna ocena rozprawy

Autor rozprawy doktorskiej zrealizował postawione cele w sposób adekwatny, używając do tego właściwej metodyki badań. Przyjęte założenia są uzasadnione. W sposób przejrzysty odniesiono się do źródeł. Cele rozprawy doktorskiej zostały osiągnięte poprzez zwiększenie funkcjonalności stacji ważenia pojazdów w ruchu (WIM), dzięki zastosowaniu adekwatnych algorytmów przetwarzania sygnałów z czujników. Wyniki przeprowadzonych badań i prac przyczynią się do rozwoju narzędzi, które mogą zwiększyć zdolność monitorowania ruchu drogowego, poprawić płynność ruchu, a tym samym podnieść poziom bezpieczeństwa na drogach. Do najistotniejszych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć przede wszystkim:

- opracowanie, implementację oraz testy regresorów do estymacji długości pojazdu;
- opracowanie, implementację oraz testy klasyfikatora do określania liczby osi pojazdu;
- opracowanie, implementację oraz testy klasyfikatorów pojazdów na podstawie sygnałów z pętli indukcyjnych;
- opracowanie, implementację oraz testy metody estymacji wagi pojazdu na podstawie sygnałów z czujników wagowych;
- opracowanie, implementację oraz testy klasyfikatora modelu i marki pojazdu na podstawie profilu magnetycznego;
- implementację, wdrożenie oraz testy klasyfikacji na podstawie sygnałów z czujników wagowych;
- współautorstwo algorytmów do oceny wiarygodności pomiarów na podstawie ważenia pojazdów w ruchu.

Pytania i uwagi krytyczne

- Proszę wyjaśnić czy przeprowadzono analizę kosztu obliczeniowego zaproponowanych w rozprawie doktorskiej algorytmów. Z uwagi na konieczność pracy stacji ważenia pojazdów w ruchu jako systemu czasu rzeczywistego złożoność obliczeniowa algorytmów będzie miała bardzo duże znaczenie. Jeśli dokonano analizy złożoności obliczeniowej, to proszę przedstawić jej wyniki lub wnioski z tych wyników.

- Proszę uzasadnić wybór filtra Savitzky-Golay. Dotyczy to w szczególności ograniczeń tego typu filtrów przy filtracji krótkich sygnałów (potencjalne zniekształcenia na brzegach sygnału) oraz silnie zaszumionych sygnałów, a także znaczącego obciążenia obliczeniowego.
- Proszę uzasadnić wybór metody wygładzania sygnału z wykorzystaniem okna trójkątnego. Dlaczego wybrane zostało okno trójkątne?
- Jak często systemy ważenia pojazdów w ruchu wymagają kalibracji? Czy przedstawione w rozprawie doktorskiej algorytmy oraz techniki mają wpływ na zmniejszenie częstotliwości kalibracji?
- Czy i w jaki sposób rozwiązano problem filtracji zakłóceń pochodzących do wibracji jezdni, interakcji z innymi pojazdami, czy też zakłóceń elektromagnetycznych?
- Czy podczas opracowywania oraz doboru algorytmów analizy i przetwarzania sygnałów uwzględniono problemy związane z nierównościami nawierzchni?
- Czy w badaniach uwzględniono ewentualną zmianę prędkości pojazdu podczas procesu ważenia?
- Czy rozważano możliwość wykorzystania filtrów adaptacyjnych do filtracji sygnałów generowanych przez czujniki wagowe?
- Jakie pasmo częstotliwościowe zajmują sygnały generowane przez poddane badaniom systemy WIM? Czy zaproponowana filtracja nie usuwa istotnych składowych widma sygnałów wagowych opisujących np. zmiany w obciążeniu osi pojazdów?
- Czy napotkano na problemy w filtracji sygnałów wagowych generowanych przez pojazdy o złożonej konstrukcji (np. naczepy), charakteryzujące się nieliniowym zachowaniem układu zawieszenia?
- Czy dokonano analizy czasowej filtrów służących do przetworzenia sygnałów wagowych? Czy podjęto próbę minimalizacji czasu trwania stanów przejściowych tych filtrów w celu przyspieszenia procesu filtracji?

Uwagi redakcyjne:

- Wzory i formuły matematyczne są częścią zdania. Należało więc stosować zasady interpunkcji.
- W przypadku większości wykresów nie opisano osi. Jednostki są nieczytelne (zastosowano zbyt małą czcionkę).

Wskazane pytania, uwagi oraz komentarze mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na ogólnie pozytywną ocenę wyników zawartych w opiniowanej rozprawie doktorskiej.

5. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że mgr inż. Tomasz Konior wykazał się dużą wiedzą z zakresu przetwarzania i analizy sygnałów, systemów transportowych oraz inżynierii drogowej. Rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Koniora pt.: „Nowe algorytmy przetwarzania, analizy i oceny danych dla niestacjonarnych systemów ważenia pojazdów w ruchu” jest oryginalnym, interesująco przedstawionym, uzasadnionym i twórczym wkładem w dyscyplinę *informatyka techniczna i telekomunikacja*. Niniejsza rozprawa doktorska zawiera poprawnie sformułowany i rozwiązany problem badawczy oraz posiada bardzo duży aspekt praktyczny. Stanowi zatem oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Poza wynikami badań Doktoranta rozprawa doktorska zawiera również szczegółowy opis systemów ważenia pojazdów w ruchu, co dodatkowo wzbogaca jej treść. Rozprawę doktorską mgr inż. Tomasza Koniora można traktować jako swoiste kompendium wiedzy z zakresu systemów WIM. Nie bez znaczenia jest również fakt, że mgr inż. Tomasz Konior jest współautorem prac naukowych, które zostały opublikowane w uznanych czasopismach naukowych, monografiach oraz w materiałach konferencji naukowych. Publikacje Doktoranta oraz ich ranga potwierdzają dodatkowo wysoką wartość merytoryczną przedstawionych wyników prac badawczych oraz rozwojowych.

W efekcie stwierdzam, że **rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Koniora spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim**, które zostały określone w artykule 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2018 poz. 1668 z późn. zm.). W związku z powyższym **wniosuję o dopuszczenie mgr inż. Tomasza Koniora do publicznej obrony rozprawy doktorskiej przed Radą Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Śląskiej.**

Z uwagi na bardzo duże walory praktyczne wyników przedstawionych w rozprawie doktorskiej, a także współautorstwo mgr inż. Tomasza Koniora artykułów opublikowanych w uznanych czasopismach naukowych (np. *Measurement* – IF: 5.2) **wniosuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.**

