

Prof. dr hab. inż. **Tomasz SIWOWSKI**
Politechnika Rzeszowska
Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury
Katedra Dróg i Mostów
35-959 Rzeszów, ul. Poznańska 2
e-mail: siwowski@prz.edu.pl

WPLYNĘŁO - WBLIW

01-09-2025

№/250/2025

Rzeszów, 22.08.2025 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Aleksandra Mroza

pt. „*Auto-adaptacyjny system identyfikacji eksploatacyjnych obciążeń drogowych obiektów mostowych z wykorzystaniem uczenia maszynowego*”

1. Przedmiot i podstawa formalna recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Aleksandra Mroza pt. „*Auto-adaptacyjny system identyfikacji eksploatacyjnych obciążeń drogowych obiektów mostowych z wykorzystaniem uczenia maszynowego*”, przygotowana na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej. Promotorem rozprawy doktorskiej był prof. dr hab. inż. Jan Bień, a promotorem pomocniczym dr inż. Tomasz Kamiński.

Recenzję wykonałem na podstawie następujących dokumentów:

- [1] Zawiadomienie Prorektora PWr prof. dr hab. inż. Dariusza Łydźby z dnia 13.06.2025 r. o wyznaczeniu na Recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora.
- [2] Pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej *Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport* Politechniki Wrocławskiej prof. dr hab. inż. Wojciecha Puły z dnia 16.06.2025r.
- [3] Rozprawa doktorska (maszynopis + płyta CD) mgr inż. Aleksandra Mroza pt. „*Auto-adaptacyjny system identyfikacji eksploatacyjnych obciążeń drogowych obiektów mostowych z wykorzystaniem uczenia maszynowego*”, Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Raport serii PRE nr 4/2025, Wrocław, maj 2025 r.
- [4] Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668, tekst ujednolicony z 2025 r.).
- [5] Recenzje w postępowaniach o awans naukowy. Poradnik. Rada Doskonałości Naukowej, Warszawa, 2022 r.

Zgodnie z art.187 ust.1 i 2 ustawy [4] oraz poradnikiem RDN [5] niniejsza recenzja zawiera w szczególności następujące oceny:

- a) ocena wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska prezentuje **ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata** w dyscyplinie „*inżynieria lądowa, geodezja i transport*”;
- b) ocena wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska wykazuje **umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej** przez Kandydata;
- c) ocena wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska stanowi **oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**.

Zgodnie z ustawą [4] oraz jej interpretacją, zawartą w poradniku RDN [5] brak jest podstaw prawnych, by recenzent wyrażał w recenzji opinie odnoszące się do innych kwestii niż te, które zostały przedstawione powyżej, a które to wynikają jednoznacznie z przepisów ustawy [4]. Jednakże pomimo podstaw prawnych recenzent odniósł się szerzej do oceny merytorycznej rozprawy oraz ocenił możliwości praktycznego zastosowania wyników rozprawy.

2. Charakterystyka ogólna rozprawy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej Kandydata [3] jest **koncepcja** auto-adaptacyjnego (lub samouczącego się) **systemu identyfikacji obciążeń eksploatacyjnych** (tj. pojazdów) **mostów drogowych**, umożliwiającego określenie parametrów pojazdów (masy, nacisku pojazdu i nacisków na osie) z wykorzystaniem **technologii uczenia maszynowego**. System będący efektem recenzowanej pracy naukowej umożliwia preselekcję oraz identyfikację obciążeń mostów pojazdami. Wiedza ta jest konieczna do efektywnego zarządzania ruchem drogowym, tworzenia dokumentów normatywnych w drogownictwie oraz do zarządzania utrzymaniem mostów, co wpływa bezpośrednio także na bezpieczeństwo i trwałość sieci drogowej.

Podstawowa treść rozprawy liczy 249 stron, podzielonych na 7 rozdziałów. Rozprawa zawiera także wykaz ważniejszych oznaczeń, spis użytej terminologii, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz spis piśmiennictwa wraz z oddzielnym wykazem źródeł internetowych. Zgodnie z art.187 ust.3 ustawy [4] rozprawa ma charakter **monografii naukowej**, obejmującej:

- a) wprowadzenie, zawierające genezę, cel i zakres oraz przegląd treści rozprawy (rozdział 1);
- b) obszerny przegląd stanu wiedzy (rozdział 2 oraz p. 3.1);
- c) opis koncepcji systemu wraz z opisem metody jego implementacji (p.3.2 i 3.3);
- d) dwie tzw. atrapy (symulatory), służące do implementacji i testowania systemu w kontrolowanych warunkach (rozdział 4);
- e) implementację i weryfikację systemu w trzech wariantach (rozdział 5);
- f) analizę stabilności wybranego wariantu systemu (rozdział 6);
- g) podsumowanie, wnioski końcowe oraz kierunki dalszych badań (rozdział 7).

Integralną częścią rozprawy są trzy załączniki (A, B i C), zawierające opisy autorskich narzędzi informatycznych, zastosowanych do tworzenia atrapy, tj. symulatora dynamicznej odpowiedzi konstrukcji mostowej oraz przedmiotowego systemu identyfikacji obciążeń eksploatacyjnych AutoSIO. Załączniki obejmują 45 stron, co daje łączną objętość rozprawy **295 stron**. Rozprawa zawiera 169 rysunków, 64 tabele, a piśmiennictwo obejmuje 126 pozycji i 8 linków do stron internetowych.

Główną i oryginalną część rozprawy stanowi **koncepcja systemu identyfikacji** obciążeń eksploatacyjnych AutoSIO, będącego autorską odmianą systemu B-WIM (ang. *Bridge-Weight-in-Motion*), stworzoną z **wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych**. System AutoSIO został opracowany w trzech wariantach w zależności od rodzaju symulowanego przejazdu (quasi-statyczny, dynamiczny). **Oryginalna** jest także koncepcja budowy i wykorzystania tzw. **atrap obiektów** (ang. *mock object*), które zostały stworzone przez Kandydata do implementacji i weryfikacji systemu AutoSIO w kontrolowanych warunkach obciążenia. W testach jednostkowych, atrapy obiektów symulują zachowanie złożonych obiektów rzeczywistych, co jest przydatne, gdy rzeczywistego obiektu nie można użyć w teście (lub gdy jest to niepraktyczne). Stworzone przez Kandydata atrapy to: (1) generator populacji pojazdów oraz (2) wirtualny model mostu, symulujące odpowiednio System Identyfikacji Pojazdów (SIP) oraz System Monitoringu Konstrukcji Mostowej (SMKM) w rzeczywistym systemie B-WIM. Wykorzystując atrapy, Kandydat nie tylko zaimplementował i przetestował autorski system AutoSIO w trzech wariantach, ale także – dla najlepszego wariantu – wykonał analizę stabilności systemu, ustalając wpływ wybranych parametrów konstrukcji mostowej oraz błędów pomiarowych na wynik działania systemu. Najważniejsze ograniczenia stworzonego systemu stwierdzone w wyniku pracy naukowej Kandydata zostały wypunktowane w kierunkach dalszych badań, wskazujących możliwości dalszego rozwoju autorskiego systemu.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

3.1. Geneza i zasadność podjęcia tematu

Jednym z narzędzi przeznaczonych do pomiaru masy i nacisków osi pojazdów oraz detekcji pojazdów przeciążonych są systemy ważenia pojazdów będących w ruchu, nazywane systemami WIM (ang. *Weigh-in-Motion*). Idea działania systemów WIM sprowadza się do pomiaru dynamicznych nacisków jakie koła jadącego pojazdu wywierają na nawierzchnię drogi oraz do estymacji na tej podstawie nacisków statycznych osi, jak również masy całkowitej pojazdu. Klasyczny system WIM składa się z czujników nacisku umieszczonych w nawierzchni drogi. Odmianą systemu WIM jest system B-WIM (ang. *Bridge-Weigh-in-Motion*), gdzie rolę opomiarowanej „wagi” pełni obiekt mostowy, w którego krytycznych punktach zainstalowano czujniki pomiarowe. W obu systemach czujniki współpracują z systemem akwizycji danych pomiarowych oraz systemem komputerowym, realizującym algorytm estymacji nacisków statycznych i masy całkowitej, gromadzącym archiwalne wyniki pomiarowe oraz nadzorującym transmisję tych wyników do systemu nadrzędnego.

Nowoczesne systemy B-WIM dostarczają identycznych danych dla poszczególnych pojazdów, jak bardziej powszechne systemy WIM dla nawierzchni. Poza tym mierzą również odkształcenia, pozwalają wyznaczyć linie wpływu, współczynniki rozkładu obciążenia i współczynniki dynamiczne obciążenia, co udoskonala analizę statyczno-wytrzymałościową mostów. Podczas gdy kalibracja i łączność z innymi typami urządzeń do monitorowania ruchu są identyczne jak w przypadku systemów WIM na drodze, oprzyrządowanie i konserwacja są prostsze i mniej inwazyjne. W większości przypadków na powierzchni jezdni mostowej nie są potrzebne żadne czujniki, dzięki czemu ruch nie jest zakłócany podczas montażu i konserwacji systemu. Systemy B-WIM mogą być także przenoszone z jednej lokalizacji do drugiej, a ta możliwość nie wpływa na dokładność wyników.

Typowy system B-WIM, który został po raz pierwszy zaproponowany przez Mosesa¹ w latach siedemdziesiątych XX wieku, składa się z dwóch elementów: jednego do pomiaru zmiennych parametrów mostu, zwykle odkształceń lub przemieszczeń, a drugiego do wykrywania osi pojazdów. Informacje dostarczane przez te dwa elementy B-WIM są następnie przekształcane w naciski pojazdu i jego osi poprzez zastosowanie specjalnych algorytmów matematycznych. Od czasów algorytmu Mosesa przeprowadzono liczne prace naukowe nad opracowaniem kolejnych modeli teoretycznych. Ostatnio w celu poprawy dokładności mierzonych nacisków osi są stosowane techniki identyfikacji siły ruchomej MFI (ang. *Moving Force Identification*). Jednakże w raporcie² z 2014 r. stwierdzono, że ówczesny poziom dokładności B-WIM jest wystarczający do tzw. preselekcji, czyli wyboru pojazdów do ważenia za pomocą wag statycznych, ale jest niewystarczający do bezpośredniego egzekwowania kar ze względu na przeciążone osie pojazdów. W raporcie szczegółowo opisano kierunki poprawy dokładności istniejących systemów B-WIM, związane głównie z ulepszeniem przetwarzania danych. Prace naukowe podjęte przez Kandydata wpisują się w ten kierunek współczesnego rozwoju systemów B-WIM.

Jako uzasadnienie podjęcia tematu dotyczącego konieczności dalszego rozwoju systemu B-WIM, Kandydat wskazał następujące aspekty:

¹ Moses F (1979) Weigh-in-motion system using instrumented bridges. *Transp Eng J* 105(3):233–249

² Richardson J, Jones S, Brown A, O'Brien E, Hajializadeh D (2014) On the use of bridge weigh-in-motion for overweight truck enforcement. *Int J Heavy Veh Syst* 21(2):83–104

- a) potrzebę monitorowania obciążeń eksploatacyjnych, pozwalającego na sprawne zarządzanie obiektami mostowymi, w tym planowanie zabiegów utrzymaniowych i niezbędnych do tego środków finansowych oraz ich właściwą alokację;
- b) potrzebę identyfikacji pojazdów przeciążonych, umożliwiającą ich skuteczną eliminację z ruchu, co wydłuży okres trwałości infrastruktury drogowej oraz obniży koszty jej utrzymania;
- c) skuteczny monitoring stanu technicznego obiektów mostowych SHM (ang. *Structural Health Monitoring*), w tym żywotności zmęczeniowej, co zwiększy trwałość i bezpieczeństwo eksploatowanych obiektów mostowych.
- d) gromadzenie danych niezbędnych do aktualizacji i rozwoju modeli obciążeń mostowych, stosowanych w projektowaniu,
- e) możliwość sterowania ruchem w celu ograniczenia przeciążenia mostów;
- f) monitorowanie zmian w strukturze ruchu drogowego.

Są to **powody uzasadnione i wystarczające** dla podjęcia przez Kandydata przedmiotowego tematu jako celu swojej pracy naukowej. Podjęcie tego tematu jest szczególnie istotne w warunkach krajowych, gdyż technologia B-WIM praktycznie nie jest stosowana w Polsce (trochę szerzej wykorzystuje się technologię WIM, m.in. do planowania trwałości konstrukcji nawierzchni oraz nakładów utrzymaniowych na drogi).

3.2. Cele rozprawy

W rozprawie doktorskiej Kandydat powinien rozwiązać problem naukowy, realizując postawiony cel (cele) i/lub udowadniając sformułowaną tezę (tezy) metodami naukowymi. W recenzowanej rozprawie Kandydat nie sprecyzował problemu naukowego, nie sformułował tezy, lecz postawił sobie **jeden główny i kilka cząstkowych celów badawczych**. Stopień realizacji tych celów został omówiony przez Kandydata we wnioskach końcowych rozprawy.

Głównym celem rozprawy doktorskiej Kandydata było **opracowanie auto-adaptacyjnego systemu identyfikacji obciążeń eksploatacyjnych drogowych obiektów mostowych z wykorzystaniem algorytmów uczenia maszynowego**. Najważniejszą dla Kandydata cechą opracowanego systemu B-WIM jest auto-adaptacja (samouczenie się), która została osiągnięta dzięki twórczemu wykorzystaniu wybranych algorytmów uczenia maszynowego, pozwalających na iteracyjne dostosowanie systemu do nowych danych w sposób analogiczny do procesu uczenia się w systemach biologicznych. Oprócz ww. celu głównego, Kandydat sprecyzował także **6 celów cząstkowych**, niezbędnych do realizacji celu głównego i obejmujących: przegląd stanu wiedzy nt. WIM oraz algorytmów uczenia maszynowego, opracowanie koncepcji systemu i metod jego implementacji, weryfikacji i walidacji, a także ocenę stabilności działania systemu oraz kluczowych czynników wpływających na jego dokładność. Efektem realizacji wszystkich celów rozprawy jest zweryfikowana koncepcja nowego systemu B-WIM, umożliwiającego spełnienie większości oczekiwań wyszczególnionych w p. 3.1 (a-f) powyżej.

W świetle przedstawionej wyżej genezy i zasadności podjęcia tematu, tak postawione cele rozprawy są **adekwatne i uzasadnione naukowo**, a także **istotne i ważne** z punktu widzenia praktycznego wdrożenia nowego narzędzia w inżynierii lądowej. Opisują one także pośrednio problem naukowy (nie sprecyzowany w rozprawie), który Kandydat rozwiązał metodami naukowymi.

3.3. Przegląd stanu wiedzy

Przegląd stanu wiedzy w przedmiocie rozprawy jest zawarty w rozdziale 2 oraz podrozdziale 3.1 (s.31-88, łącznie 57 stron) co stanowi ok. 23% jej podstawowej treści i obejmuje: (a) przegląd wiedzy nt. systemów WIM i B-WIM oraz (b) przegląd wiedzy nt. technologii uczenia maszynowego. Przegląd stanu wiedzy obejmuje blisko 100 pozycji, praktycznie wyłącznie zagranicznych (wyjątek stanowią prace zespołu P. Burnosa z AGH: [8]-[11] oraz [68]-[69]), opublikowanych w przeważającej większości w ostatnich 25 latach. Jest więc to wiedza w przedmiocie pracy stosunkowo nowa, dlatego wnioski z jej przeglądu można uznać za aktualne, a podsumowanie obu przeglądów (w szczególności p. 2.6) stanowi rzetelne uzasadnienie przyjętych kierunków badań własnych Kandydata.

Przegląd stanu wiedzy w rozdziale 2 Kandydat rozpoczął od przedstawienia historii systemu WIM, opisu jego działania oraz przedstawienia problemów dotyczących dokładności uzyskiwanych wyników. Znacznie dokładniej Kandydat scharakteryzował systemy B-WIM, będące bezpośrednio przedmiotem jego pracy naukowej. Bazując na własnym schemacie konfiguracji systemu B-WIM (rys. 2.2) Kandydat opisał szczegółowo poszczególne jego składniki, kolejno: Systemy Identyfikacji Pojazdów (SIP), Systemy Identyfikacji Obciążeń (SIO) oraz Systemy Monitoringu Konstrukcji Mostowej (SMKM). Najszerzej i najdokładniej zostały przedstawione systemy SIO (co zrozumiałe ze względu na przedmiot rozprawy), wśród których zostały zaprezentowane algorytmy quasi-statyczne (bazujące na algorytmie Mosesa z 1979 r.) oraz algorytmy dynamiczne (MFI).

Najmniej miejsca – co budzi może budzić zdziwienie ze względu na przedmiot pracy – Kandydat poświęcił przeglądowi wiedzy nt. algorytmów wspartych uczeniem maszynowym ML (ang. *Machine Learning*). Ta część rozprawy zawiera omówienie jedynie 3 pozycji piśmiennictwa ([60]-[62]) z lat 2009 – 2021. Cechą wspólną ww. prac [60]-[62] jest wykorzystanie metod ML opierających się na uczeniu nadzorowanym. Bazując na tym wniosku, Kandydat postawił sobie za zadanie wykorzystanie we własnym systemie AutoSIO uczenia nienadzorowanego, słusznie zakładając, że będzie to stanowić znaczący rozwój technologii B-WIM, bo pozwoli na doskonalenie się systemu bez ingerencji człowieka (tzw. auto-adaptację). Tymczasem tylko pobieżny przegląd dostępnego piśmiennictwa pozwolił recenzentowi na znalezienie kolejnych 6 prac z lat 2020-2024, w których autorzy opisują znaczący rozwój systemów B-WIM opartych na uczeniu maszynowym, wykorzystujących głównie SSN³⁴⁵⁶⁷⁸. Powstaje zatem pytanie, czy w świetle tych prac kierunki rozwojowe systemu B-WIM przyjęte przez Kandydata są aktualne?

Druga część przeglądu wiedzy, zawarta w podrozdziale 3.1, dotyczy algorytmów uczenia maszynowego (ML). Kandydat omawia kolejno rodziny algorytmów, podstawowe typy zadań możliwych do rozwiązania za pomocą poszczególnych algorytmów, podstawowe klasyfikacje metod uczenia maszynowego, sieci neuronowe i uczenie głębokie, neuronowe sieci spłotowe oraz sieci zwane autodekodrami. Jest to syntetycznie podana wiedza ogólna nt. uczenia

³ Wang, Zhichao, and Yang Wang. "Bridge weigh-in-motion through bidirectional Recurrent Neural Network with long short-term memory and attention mechanism." *Smart Struct. Syst* 27.2 (2021): 241-256.

⁴ Li, Yuqin, et al. "Deep Learning Overloaded Vehicle Identification for Long Span Bridges Based on Structural Health Monitoring Data." *arXiv preprint arXiv:2309.01593* (2023).

⁵ Vuong, H. T., A. Takasu, and T. P. Doan. "Deep sensor-fusion approach to vehicle detection on bridges using multiple strain sensors." *Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems*. CRC Press, 2023. 1935-1942.

⁶ Arnold, Matthias, and Sina Keller. "Machine learning and signal processing for bridge traffic classification with radar displacement time-series data." *Infrastructures* 9.3 (2024): 37.

⁷ Yan, Wangchen, et al. "Hybrid-data-driven bridge weigh-in-motion technology using a two-level sequential artificial neural network." *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* (2025).

⁸ Zeng, Yan, et al. "Deep learning-based identification of vehicular moving forces for bridges without axle configurations." *Engineering Structures* 304 (2024): 117646.

maszynowego, niezbędna czytelnikowi rozprawy do właściwego zrozumienia wyników pracy naukowej Kandydata.

Przegląd stan wiedzy związanej z rozwojem systemów B-WIM, wyraźnie wskazuje na coraz szersze zastosowanie w tym celu algorytmów uczenia maszynowego ML. Na tym tle badania naukowe Kandydata będące przedmiotem jego rozprawy doktorskiej **doskonale wpisują się zarówno w trendy naukowe jak i potrzeby rynkowe** współczesnej inżynierii lądowej w obszarze drogownictwa. Abstrahując od wielu wątpliwości, które są związane z praktycznym wykorzystaniem nowego narzędzia jakim jest autorski system AutoSIO, podjęcie się przez Kandydata pionierskich w Polsce badań nad stworzeniem systemu B-WIM opartego na algorytmach ML **uwzględniłem za bardzo ważne i uzasadnione**.

3.4. Koncepcja systemu i metoda jego implementacji

Koncepcja systemu identyfikacji obciążeń obiektów mostowych nazwanego AutoSIO oraz metoda jego implementacji została przedstawiona w p. 3.2 i 3.3. rozprawy. Jako że jest to **główny, tytułowy cel rozprawy, a co za tym idzie – główne osiągnięcie naukowe Kandydata**, należało się tej treści bardziej eksponowane miejsce w rozprawie i trochę szersze omówienie konceptu. Architekturę własnego systemu przedstawioną na rys.3.12 Kandydat oparł na wcześniej zaprezentowanym schemacie ogólnym systemu B-WIM (rys. 2.2). Przedstawiona architektura jest błędnie moim zdaniem podpisana jako AutoSIO, gdyż obejmuje koncepcję autorskiego systemu B-WIM, składającego się z wszystkich 3 głównych modułów systemu B-WIM, tj. SIP, SMK oraz SIO. W autorskiej koncepcji B-WIM Kandydat nie sprecyzował własnych propozycji w zakresie SMK (techniki pomiarowe), lakonicznie przedstawił własną propozycję dotyczącą SIP (system wizyjny), oraz opisał podstawowe założenia proponowanego systemu SIO, będącego najważniejszą częścią systemu B-WIM. Właśnie ten moduł systemu B-WIM jest przedmiotem rozprawy doktorskiej.

Najważniejszym założeniem przyjętym przez Kandydata dla własnego systemu AutoSIO jest jego auto-adaptacyjność (samo uczenie się). Dla osiągnięcia tej cechy systemu Kandydat zastosował sztuczne sieci neuronowe zwane autodekoderami, wykorzystujące uczenie nienadzorowane. Stworzenie takiej sieci **było najtrudniejszym, a zarazem najbardziej oryginalnym osiągnięciem Kandydata** w jego rozprawie. Aby było to w ogóle możliwe, Kandydat przyjął kolejne założenia upraszczające dla własnego systemu, w tym dotyczące schematu statycznego i wielkości obiektu mostowego, liczby pasów ruchu, lokalizacji i liczby pojazdów oraz liczby osi, dyskretnego sygnału wejściowego (pojedyncze przemieszczenie w środku rozpiętości przęsła) oraz znajomości funkcji wpływu. Założenia te znacznie ograniczają możliwość praktycznego stosowania systemu, czego świadomość ma Kandydat wskazując konieczność likwidacji tych ograniczeń w kierunkach dalszych badań (p.7.2 rozprawy).

Integralną częścią koncepcji własnego systemu AutoSIO jest metoda jego implementacji, testowania i weryfikacji (p. 3.3). Pojęcie „implementacja” oznacza tu proces programowania, czyli tworzenia kodu źródłowego lub efekt tego procesu, gotowy program, a nie wdrożenie, przystosowanie lub realizację. W tym celu Kandydat zastosował technikę testowania systemu za pomocą obiektów atrap. Stworzył w tym celu dwie atrapy - symulatory: (1) generator populacji pojazdów oraz (2) wirtualny model mostu. W ogólnym systemie B-WIM pierwsza z atrap symuluje SIP, a druga symuluje SMK. Oba symulatory (atrapy) zostały stworzone wyłącznie w celu testowania systemu AutoSIO i nie mają innego znaczenia praktycznego (przynajmniej Kandydat takiego nie wskazał). Niezależnie od tego, **stworzenie i zastosowanie**

obu atrap w implementacji, testowaniu i weryfikacji poprawności działania systemu AutoSIO należy także uznać za **oryginalne osiągnięcie naukowe Kandydata**.

3.5. Budowa narzędzi informatycznych do testowania i weryfikacji systemu

Obie atrapy, tj. (1) generator populacji pojazdów oraz (2) wirtualny model mostu to autorskie programy komputerowe, które wraz z programem zarządzającym, tworzą „*symulator dynamicznej odpowiedzi konstrukcji mostowej na obciążenie pojazdami*”, symulujący działanie dwóch głównych modułów systemu B-WIM: SIP oraz SMK. W typowym systemie B-WIM moduły SIP oraz SMK zbierają i przetwarzają rzeczywiste informacje o pojazdach oraz rzeczywiste odpowiedzi konstrukcji mostowej pod obciążeniem pojazdami. Na podstawie tych informacji system SIO jest w stanie oszacować rzeczywisty nacisk (masę) pojazdu oraz jego poszczególnych osi. Ponieważ w ramach własnych prac naukowych Kandydat nie zakładał tworzenia i/lub stosowania danych z wdrożonego SIP oraz wykonywania pomiarów na rzeczywistym obiekcie (SMK) musiał stworzyć symulatory obu tych modułów. Ważną i kluczową zaletą tych symulatorów jest możliwość zapewnienia pełnej kontroli parametrów wejściowych, co pozwala na porównanie wartości nacisków oszacowanych przez AutoSIO z wartościami symulowanymi. Z drugiej strony nasuwa się pytanie, czy stworzonego systemu AutoSIO nie można było testować, weryfikować i oceniać jego stabilność za pomocą danych rzeczywistych, uzyskanych z własnych (nawet ograniczonych) SIP i SMK. W pierwszym przypadku można było wykorzystać którąś z technik wizyjnych, w drugim – wykonać pomiary na małym moście, pełniącym rolę wagi. Wydaje się, że pracochłonność przy pozyskaniu danych rzeczywistych nie byłaby większa niż przy tworzeniu informatycznych symulatorów – atrapy. Oczywiście niezbędny do tego byłby specjalistyczny sprzęt do detekcji wizyjnej i monitoringu konstrukcji.

Pierwszą z atrap stworzonych przez Kandydata, symulującą SIP, jest algorytm (rys. 4.58) do automatycznego generowania pojazdów o różnych parametrach rozkładu osi z uwzględnieniem następujących założeń (ograniczeń): sylwetki pojazdów wg badań [122]; naciski na osie wg Dyrektywy [12], rozkłady nacisków pojazdów wg badań [122] dla miejscowości Byczyna w ciągu DK 11, udziały pojazdów w ruchu wg GPR 2021 [5], udział pojazdów przeciążonych - 10%. Wygenerowana dla ww. założeń populacja pojazdów została następnie podzielona na część służącą do trenowania sieci oraz część do testowania systemu. Napisany przez Kandydata program komputerowy – atrapę SIP zamieszczono w załączniku B.2 rozprawy. Wyjaśnienia wymagają przyjęte arbitralnie założenia o wyborze pomiarów nacisków w miejscowości Byczyna oraz przyjętym poziomie pojazdów przeciążonych.

Druga atrapa – wirtualny model mostu – jest zdecydowanie bardziej złożona. Wirtualny model mostu został złożony przez Kandydata z 3 modeli składowych: modelu geometrii, modelu materiału oraz modelu obciążenia (tj. pojazdów). W tym zestawie najbardziej złożone są modele pojazdów, a ich analiza parametryczna stanowi najtrudniejszą część prac badawczych Kandydata. Dygresja: czy modele pojazdów nie powinny wchodzić w skład atrapy SIP, a nie atrapy SMK? Tworząc ten symulator Kandydat postawił sobie za cel uwzględnienie w nim maksymalnie możliwej do zamodelowania liczny zmiennych, charakteryzujących układ pojazd – most.

I tak w modelu konstrukcji symulator uwzględnia:

- a) dwa różne modele geometrii konstrukcji (ciągły i dyskretny);
- b) dwa sposoby opisu tłumienia modalnego konstrukcji, związane z ww. modelami geometrii;
- c) wpływ (lub jego brak) nierówności nawierzchni jezdni na moście.

W zakresie modelu pojazdów symulator uwzględnia:

- d) cztery referencyjne modele pojazdów drogowych ze względu na liczbę osi;
- e) trzy modele pojazdów ze względu na symulację sztywności i tłumienia zawieszenia pojazdów: podstawowy – zbiór sił bez resorowania, rozszerzony – zbiór punktów masowych resorowanych i tłumionych, szczegółowy – zbiór punktów masowych resorowanych i nieresorowanych połączonych tłumikami;

Przyjęte modele konstrukcji i pojazdów (model materiału jest stały dla wszystkich modeli) tworzą łącznie **4 wirtualne modele obliczeniowe mostu** (atrapa SMKM), które zostały poddane dwojakiego rodzaju analizie: metodą analityczno – numeryczną (równania i układy zamkniętych równań ruchu, rozwiązywanych za pomocą oprogramowania stworzonego w języku Python) oraz metodą elementów skończonych (MES).

Kandydat przeprowadził walidację stworzonych modeli obliczeniowych przez porównanie rozwiązań uzyskanych metodą analityczno – numeryczną (Python) z wynikami uzyskanymi za pomocą MES. Walidacja została wykonana dla wszystkich 4 referencyjnych modeli pojazdów z uwzględnieniem wszystkich 3 sposobów modelowania zawieszenia oraz z uwzględnieniem (bądź nie) nierówności jezdni. Łącznie wykonano $2 \times 4 \times 3 \times 2 = 48$ symulacji, które potwierdziły zbieżność wszystkich rozwiązań. Największą zgodność, co było łatwe do przewidzenia, uzyskano dla modelu szczegółowego, uwzględniającego w sposób najbardziej złożony sztywność i tłumienie zawieszenia pojazdów.

Wykorzystując walidowane modele obliczeniowe Kandydat przeprowadził szeroką **analizę parametryczną** (wykorzystując wszystkie $4 \times 3 = 12$ modeli pojazdów) mającą na celu ustalenie wpływu wybranych parametrów konstrukcji oraz pojazdów na wynik analizy, tj. odpowiedź dynamiczną konstrukcji. Celem tej analizy był dobór właściwych modeli konstrukcji i pojazdów do treningu, testowania i weryfikacji algorytmów identyfikacji obciążeń, tworzących system AutoSIO. Jak łatwo można było przewidzieć, analiza wykazała brak wpływu stałych w czasie parametrów konstrukcji (masa, rozpiętość, tłumienie konstrukcji, nierówności nawierzchni) oraz znaczący wpływ zmiennych parametrów pojazdów (prędkość, sztywność i tłumienie zawieszenia) na dokładność systemu. Po wykazaniu ich istotności, zmienne parametry pojazdów zostały uwzględnione w generatorze populacji pojazdów (atrapa pierwsza).

W podsumowaniu, w celu wskazania najlepszego modelu obliczeniowego i metody jego analizy, Kandydat zestawił uśredniony czas potrzebny do wykonania 1 analizy przez stworzone narzędzia informatyczne. Na tej podstawie Kandydat odrzucił MES jako zdecydowanie najwolniejszą metodę analizy, preferując wybór programów napisanych w języku Python. Należy jednak pamiętać, że wniosek ten Kandydat wyciągnął na podstawie własnych doświadczeń pracy na komputerze domowym, uwzględniając ograniczenia licencyjne zastosowanego oprogramowania MES. Wszystkie obliczenia niezbędne do stworzenia atrapy drugiej zostały wykonane za pomocą autorskich programów stworzonych przez Kandydata w języku Python (załącznik B.4). W tym języku został stworzony także program zarządzający (załącznik B.3), tworzący wspólne z obiema atrapami autorski „symulator”.

Kandydat przy tworzeniu narzędzi informatycznych do testowania i weryfikacji systemu wykazał się dobrą znajomością dynamiki konstrukcji i umiejętnością stosowania oprogramowania Python do rozwiązywania równań ruchu oraz modelowania wielu różnych procesów towarzyszących pracy dynamicznej układu pojazd – most, jak np. nierówności nawierzchni mostu czy zawieszenie pojazdu.

3.6. Implementacja i weryfikacja autorskiego systemu AutoSIO

Opisana w rozdziale 5 i załączniku C implementacja tytułowego systemu AutoSIO to najważniejsza część rozprawy, w której Kandydat pokazał realizację głównego jej celu. Do tworzenia systemu AutoSIO Kandydat wykorzystał sztuczne sieci neuronowe, zdolne do samodoskonalenia się, których celem było rozwiązanie problemu odwrotnego: określenie całkowitego nacisku pojazdu oraz nacisków poszczególnych osi na podstawie statycznej i/lub dynamicznej odpowiedzi konstrukcji mostowej (tutaj: ugięcia w środku rozpiętości). W pierwszej kolejności Kandydat stworzył dwie bazy danych, korzystając z ww. opisanych symulatorów (atrap): bazę pojazdów i bazę odpowiedzi konstrukcji mostowej. Kolejno zdefiniował i stworzył architekturę sieci neuronowych dla 3 wariantów systemu, różniąc rodzaj symulowanego przejazdu (quasi-statyczny, dynamiczny). Korzystając z baz danych Kandydat wytrenował, przetestował i zweryfikował poszczególne sieci, wyciągając wnioski nt. dokładności oszacowania nacisków. Zastosowany rodzaj sieci neuronowych pozwolił na tytułową auto-adaptację (samouczenie, samodoskonalenie) dzięki zastosowaniu uczenia nienadzorowanego. Dla uzyskanych wyników w każdym wariantcie Kandydat wykonał analizę błędów oszacowania nacisku pojazdu i nacisku poszczególnych osi oraz analizę parametryczną wpływu prędkości oraz masy pojazdu na wielkość błędu oszacowania, a także analizę korelacji Spearmana pomiędzy parametrami wejściowymi.

W rozprawie Kandydat przedstawił 3 warianty systemu AutoSIO:

- a) system quasi-statyczny (AutoSIO_S) wykorzystujący algorytm Mosesa (bez wpływów dynamiki) i odpowiednie funkcje wpływu;
 - b) system statyczno – dynamiczny (AutoSIO_SD) wykorzystujący algorytm jw. i odpowiednie funkcje wpływu z uwzględnieniem dynamicznej natury przejazdu (?);
 - c) system dynamiczny (AutoSIO_D) wykorzystujący algorytm jw. lecz bez funkcji wpływu
- Poza ww. różnicą w budowie sieci neuronowych, układ programu AutoSIO jest taki sam.

Dwa pierwsze systemy wykorzystują znane funkcje wpływu, tj. elementy charakteryzujące obiekt mostowy (teoretyczne lub wyznaczone na obiekcie). W trzecim wariantcie brak jest takiej wiedzy o konstrukcji. Kandydat niezbyt precyzyjnie przedstawił w rozprawie pozostałe różnice pomiędzy budową poszczególnych wariantów systemu. W szczególności Kandydat nie wyjaśnił, w jaki sposób uwzględnił „efekty pochodzenia dynamicznego” w systemach AutoSIO_SD i AutoSIO_D.

Wnioski z testowania wszystkich trzech wariantów systemu w postaci wybranych miar oceny dokładności działania omówił Kandydat w p.5.5 i zestawiał syntetycznie w Tabeli 5.4. Biorąc pod uwagę wielkość błędów oszacowania nacisków (całkowitego i osiowych) najlepszy okazał się system najprostszy, tj. Auto SIO_S (!), i to niezależnie od zakresu ocenianych parametrów zmiennych (prędkości i masy pojazdu). Błędy oszacowania całkowitego nacisku są bardzo małe (rzędu 2-3%), trochę większe są błędy oszacowania nacisku poszczególnych osi (8-18%). Kilka procent większe błędy uzyskano dla systemu mieszanego Auto SIO_SD, lecz w przypadku pojedynczych osi błąd dochodził aż do ok. 45%. Całkowicie negatywnie został oceniony system dynamiczny Auto SIO_S, dla którego błąd wynosił w zakresie 500 – 700%. Głównym powodem tak dużej niedokładności był brak opisu funkcji wpływu. Pozytywnie natomiast wypadła weryfikacja zdolności do auto-adaptacji (samodoskonalenia) opisanych systemów. Przedstawione przez Kandydata wyniki testowania autorskich systemów Auto SIO nasuwają recenzentowi parę pytań, sformułowanych w p. 4 recenzji.

3.7. Badanie stabilności systemu AutoSIO

Oprócz weryfikacji stworzonego przez siebie systemu, Kandydat ocenił także niezawodność i odporność systemu na zmienne warunki w realnym (?) środowisku. Do oceny stabilności Kandydat wybrał wariant mieszany Auto SIO_SD, pomimo tego, że dokładniejszy (lepszy) okazał się wariant quasi-statyczny. W rozdziale 6 rozprawy Kandydat rozpatrzył wpływ zmienności zarówno parametrów konstrukcji (rozpiętość, masa, nierówność nawierzchni, jak również szumów pomiarowych, związanych z danymi z systemu SMK (sygnał odpowiedzi konstrukcji, pomiar funkcji wpływu, przeskalowanie funkcji wpływu) oraz z danymi z systemu SIP (pomiar konfiguracji osi pojazdu, pomiar prędkości pojazdu). Oceniono także wpływ liczby danych z bazy SIP. Do testowania sieci (systemu) Kandydat zastosował stworzone atrapy (symulatory), pozwalające na pełną kontrolę nad analizą wpływu zmienności ww. parametrów na dokładność oszacowania nacisków.

Ustalenie wpływów badanych zmiennych na dokładność oszacowania nacisków, pomimo wykorzystania symulatorów (atrap), pozwala na lepsze projektowanie i budowę obu modułów realnego systemu B-WIM (SIP, SKMK). Podkreślić należy, że największy wpływ na dokładność prognozowania nacisków mają niepewności przy pomiarach związanych z ustalaniem funkcji wpływu (próbne obciążenie mostu – wagi) oraz w przypadku przeskalowania funkcji wpływu. Badanie stabilności systemu Auto SIO_SD potwierdziło **kluczowe znaczenie funkcji wpływu**, zarówno jej dokładnej postaci jak również dokładności pomiarów (obliczeń), służących do jej wyznaczenia.

3.8. Podsumowanie rozprawy

Podsumowanie rozprawy zawiera **zestawienie wniosków jakościowych i ilościowych**, sformułowanych przez Kandydata w głównych rozdziałach rozprawy (rozdziały 5 i 6) oraz sugerowane przez Kandydata kierunki dalszych badań w przedmiocie rozprawy. W podsumowaniu Kandydat odniósł się bezpośrednio do celów rozprawy, a poszczególne wnioski końcowe (jest ich w sumie 13) zawierają informacje potwierdzające realizację tych celów.

Stopień realizacji celów rozprawy jest bardzo dobry. Kandydat w satysfakcjonujący sposób przedstawiał w rozprawie autorski system identyfikacji eksploatacyjnych obciążeń drogowych obiektów mostowych, stworzony z wykorzystaniem uczenia maszynowego (tj. sztucznych sieci neuronowych). Oprócz implementacji systemu, wykonał jego testowanie i weryfikację, a także zbadał stabilność systemu. Do realizacji tych zadań opracował i wdrożył autorską metodę implementacji systemu za pomocą symulacji dynamicznej odpowiedzi konstrukcji za pomocą dwóch atrap - symulatorów. Implementacja systemu potwierdziła jego auto-adaptacyjność, co również było jednym z głównych celów rozprawy. Kandydat zrealizował również wszystkie postawione w rozprawie cele cząstkowe, warunkujące realizację celu głównego. We wnioskach końcowych Kandydat jeszcze raz wskazał na zalety autorskiego systemu oraz wykazał jego ograniczenia.

Mając świadomość tych ograniczeń, Kandydat **sprecyzował kierunki dalszych badań nad udoskonaleniem i wdrożeniem systemu**. Wśród nich są m.in: rozbudowa modelu mostu – wagi, uwzględnienie wpływu stanu obiektu na skuteczność systemu, pilotażowe wdrożenie systemu na rzeczywistym obiekcie mostowym oraz zastosowanie systemu w prognozowaniu nośności zmęczeniowej mostów. Kierunki te wynikają wprost z doświadczeń uzyskanych przez Kandydata podczas realizacji własnych badań naukowych, będących przedmiotem rozprawy. Wnioskowane przez Kandydata kierunki dalszych badań są zarówno oczywiste (w świetle

wyników rozprawy), jak również fundamentalne dla dlaczego rozwoju oraz praktycznego zastosowania nowej technologii B-WIM. Jednakże szeroki zakres koniecznych badań oraz uzyskane przez Kandydata wnioski **każą zadać podstawowe pytanie o praktyczny sens tego rozwoju** w kontekście sterowania ruchem drogowym w celu ograniczenia przeciążania obiektów mostowych. Do tego Kandydat w podsumowaniu się nie odniósł, choć było to jednym z ważniejszych powodów podjęcia tematu w rozprawie doktorskiej.

3.9. Zastosowane w rozprawie metody i narzędzia badawcze

Do realizacji badań naukowych Kandydat wykorzystał wiele **autorskich narzędzi informatycznych** (programów), napisanych w języku Python. Ich kody źródłowe zostały przedstawione w załącznikach do rozprawy. Python to popularny, wysokopoziomowy język programowania, znany ze swojej czytelności i prostoty. Jest wszechstronny, co pozwala na tworzenie różnorodnych aplikacji, od prostych skryptów po zaawansowane systemy.

Do implementacji systemu AutoSIO Kandydat zastosował wybrane algorytmy uczenia maszynowego z rodziny **sztucznych sieci neuronowych** (SSN), dostosowane do charakteru zadań, niezbędnych do rozwiązania w celu identyfikacji nacisków pojazdów i osi, takich jak regresja, odszumianie, redukcja wymiarowości itp. Kandydat wykorzystał i stworzył autorskie programy wykorzystujące następujące sieci neuronowe (s.72): sieci jednokierunkowe (regresja), sieci splotowe (redukcja wymiarowości) oraz autodekodery (odszumianie).

W analizach błędu oszacowania nacisków w systemie AutoSIO Kandydat wykorzystał **analizy statystyczne** dla oceny populacji testowych, w tym wyznaczył takie wielkości jak: odchylenie standardowe, kwantyle i kwartyle, skośność oraz kurtozę. Oprócz wykorzystania ww. wielkości statystycznych w analizie parametrycznej wyników działania systemu Kandydat wykorzystał także **analizę korelacji Spearmana** pomiędzy błędami a wybranymi parametrami wejściowymi (prędkość, całkowity nacisk, rozstaw osi).

Zastosowane metody i narzędzia badawcze wymagały od Kandydata **integracji wiedzy z różnych dyscyplin naukowych** z dziedziny nauk inżynierijno – technicznych, tj. „inżynierii lądowej, geodezji i transportu” oraz „informatyki technicznej i telekomunikacji”, a także w pewnym zakresie z dyscyplin „informatyka” i „matematyka” z dziedziny nauk ścisłych i przyrodniczych. Tak szeroki i interdyscyplinarny obszar badań naukowych Kandydata świadczy o jego **bardzo dużej ogólnej wiedzy teoretycznej**, nie tylko w reprezentowanej przez niego dyscyplinie naukowej. Tak szeroka interdyscyplinarność przeprowadzonych przez Kandydata badań naukowych potwierdza także wskazaną przeze mnie wcześniej **oryginalność zastosowanego rozwiązania problemu naukowego**.

4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Poniżej przedstawiłem zbiorczo **uwagi krytyczne i dyskusyjne oraz wątpliwości i pytania**, które sformułowałem po analizie rozprawy i jej ocenie merytorycznej, przedstawionej w p.3 (kolejność zgodna z tekstem rozprawy).

- 4.1. Przegląd piśmiennictwa nt. systemów B-WIM opartych na algorytmach SSN zawiera tylko 3 prace z lat 2009-2021. Czy i jak nowsze publikacje z lat 2023-2024 wymienione w recenzji na str. 5, a nie uwzględnione w przeglądzie Kandydata, modyfikują koncepcję autorskiego systemu, wnioski końcowe rozprawy i/lub kierunki rozwojowe przyjęte przez Kandydata?

- 4.2. Które z przyjętych przez Kandydata założeń upraszczających przy tworzeniu AutoSIO (liczba pasów i kierunków ruchu, liczba osi, rodzaj sygnału odpowiedzi, funkcja wpływu, stan techniczny obiektu) może stanowić największą barierą dla dalszego rozwoju systemu i dlaczego?
- 4.3. Czy autorskiego systemu AutoSIO nie można było trenować, testować, weryfikować i oceniać jego stabilność za pomocą danych rzeczywistych, uzyskanych z własnych (nawet ograniczonych) SIP i SKMG? W pierwszym przypadku można było stosunkowo łatwo wykorzystać którąś z technik wizyjnych, w drugim – wykonać pomiary własne na małym moście, pełniącym rolę wagi. Wydaje się, że pracochłonność przy pozyskaniu danych rzeczywistych nie byłaby większa, niż przy tworzeniu informatycznych symulatorów – atrap, które nigdy nie będą zgodne z rzeczywistością.
- 4.4. Wyjaśnienia wymaga arbitralnie przyjęcie przez Kandydata do budowy atrapy SIP pomiarów nacisków w miejscowości Byczyna oraz liczby pojazdów przeciążonych.
- 4.5. Czy modele dotyczące pojazdów (pojazd referencyjny, zawieszenie) nie powinny być częścią atrapy SIP, a nie atrapy SMK (dotyczy stworzonego symulatora)?
- 4.6. W jaki sposób Kandydat uwzględnił „efekty pochodzenia dynamicznego” w systemach AutoSIO_SD i AutoSIO_D? Brak tej informacji w p.5.3 i 5.4. Czy zastosowano jeden z algorytmów dynamicznych MFI (por. p.2.4.3)? Czy niewielki wpływ „efektów pochodzenia dynamicznego” na dokładność oszacowania uzasadnia rozbudowę sieci (systemu) o symulację tych efektów?
- 4.7. Czy było uzasadnione pracochłonne i kosztowne (obliczeniowo) uwzględnianie wpływu efektów dynamicznych, skoro najlepsze wyniki otrzymano dla systemu quasi-statycznego, opartego na algorytmie Mosesa z 1979 r.?
- 4.8. Czy na podstawie wiedzy Kandydata (zdobytej podczas realizacji rozprawy) można przewidzieć dokładność systemu AutoSIO nauczonego i przetestowanego za pomocą danych rzeczywistych, pochodzących z realnych, a nie symulowanych baz danych SIP oraz SMK? Czy wyznaczona w rozprawie dokładność systemu się potwierdzi, będzie mniejsza lub większa?
- 4.9. Dlaczego do analizy stabilności systemu wybrano wariant mieszany Auto SIO_SD, skoro dokładniejszy (lepszy) okazał się wariant quasi-statyczny?
- 4.10. Celem badań stabilności systemu (rozdział 6) była ocena „niezawodności i odporności systemu na zmienne warunki w realnym środowisku”. Czy zastosowanie do tego symulatorów tego środowiska (atrap) uzasadnia stwierdzenie o „realnym środowisku”?
- 4.11. Badanie stabilności systemu AutoSIO wykazało kluczowe znaczenie funkcji wpływu, zarówno jej dokładnej postaci jak również dokładności pomiarów, służących do jej wyznaczenia. Jak Kandydat sugeruje jej najlepsze wyznaczenie w celu zastosowania systemu AutoSIO?

5. Ocena strony formalnej i redakcji rozprawy

Układ rozprawy jest zasadniczo poprawny zarówno od strony formalnej (wyjątek poniżej), jak również merytorycznej. Redakcja tekstu rozprawy jest właściwa, na dobrym poziomie, bez większych błędów formalnych i edytorskich. Język rozprawy jest poprawny technicznie, spójny i zrozumiały.

Poniżej przedstawiłem **kilka najważniejszych uwag natury redakcyjnej**, jakie zauważałem oceniając tekst rozprawy:

- a) podrozdział 3.1 powinien być częścią rozdziału 2, gdyż dotyczy przeglądu stanu wiedzy i częściowo dubluje p. 2.4.4;
- b) opis osi poziomej jako „sygnał” na rys. 5.5, 5.25 oraz 5.46 jest niezrozumiały;
- c) błędnie opisane kolumny Tabeli 5.4 jako AutoSIN, zamiast AutoSIO; w tej samej tabeli brak numerów podrozdziałów w pierwszej kolumnie;
- d) brak jednolitej i akceptowalnej w pracach naukowych (np. APA, MLA, ISO 690) formy prezentacji piśmiennictwa, zestawionego na końcu rozprawy; źródła internetowe nie są cytowane w tekście rozprawy;
- e) część tekstu i rysunków ujęta w załącznikach (z wyjątkiem opisów programów autorskich) powinna być zamieszczona w głównej części rozprawy.

6. Ocena spełnienia przez rozprawę doktorską warunków określonych w art.187 ust.1 i 2 ustawy [4]

6.1. Ocena ogólnej wiedzy teoretycznej Kandydata w dyscyplinie „inżynieria lądowa, geodezja i transport”

Analiza treści rozprawy pozwala uznać ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie „inżynieria lądowa, geodezja i transport” jako **wystarczającą i satysfakcjonującą w świetle wymagań ustawowych**. Kandydat wykazał się dobrą wiedzą ogólną w zakresie mechaniki, a w szczególności dynamiki budowli, obiektów mostowych i ich obciążeń, monitoringu i technik pomiarowych do oceny zachowania konstrukcji budowlanych oraz współczesnych narzędzi informatycznych wspomagających projektowanie i monitoring konstrukcji. Tworzenie i wykorzystanie nowoczesnych narzędzi informatycznych w języku Python dla zagadnień inżynierii lądowej, opartych na bardzo dobrej wiedzy teoretycznej w szczególności w zakresie dynamiki budowli, jest głównym obszarem wiedzy eksperckiej Kandydata. Kandydat nie tylko zna algorytmy teoretyczne opisujące zachowanie się konstrukcji mostowej pod wpływem obciążeń dynamicznych, ale także potrafi je twórczo zaadoptować w tworzonych narzędziach informatycznych, co znacząco ułatwia, przyspiesza i zwiększa dokładność prowadzonych analiz. Na podkreślenie zasługuje zwłaszcza wykorzystanie w tworzonych narzędziach informatycznych algorytmów uczenia maszynowego, co wpisuje się w jeden z ważniejszych trendów rozwojowych w inżynierii lądowej.

Wiedza ogólna Kandydata nie ogranicza się jedynie do inżynierii lądowej, ale obejmuje także **dyscypliny „informatyka” i „matematyka”** z dziedziny nauk ścisłych i przyrodniczych, pozwalając Kandydatowi prowadzić badania naukowe z wykorzystaniem autorskich narzędzi informatycznych, tworzonych w najbardziej otwartym współcześnie języku programowania Python. Stworzone przez kandydata narzędzia informatyczne umożliwiły realizację celów pracy i warunkowały osiągnięcie jej zadowalających efektów naukowych. W rozprawie Kandydat wykazał także dobrą znajomością matematyki (do opisu zagadnień dynamiki

budowli oraz sztucznych sieci neuronowych), a zwłaszcza statystyki dla oceny populacji testowych (skośność, kurtoza, analiza korelacji Spearmana). Elementy wiedzy Kandydata z dyscyplin „informatyka” i „matematyka” są widoczne głównie w przeglądzie piśmiennictwa (rozdział 2), gdzie bardzo profesjonalnie Kandydat przedstawił przegląd różnego rodzaju algorytmów, stosowanych do opisu zagadnień związanych z przedmiotem rozprawy. Interdyscyplinarność wiedzy ogólnej Kandydata jest w dzisiejszym czasie bardzo pożądana, gdyż rozwój inżynierii lądowej jest napędzany w dużym stopniu osiągnięciami współczesnej informatyki (narzędzia) oraz wykorzystaniem systemów opartych na sztucznej inteligencji.

Współczesna inżynieria lądowa stała się już dawno nauką interdyscyplinarną, a rozprawa Kandydata dokładnie pokazuje zasadność tego stwierdzenia. Kandydat w rozprawie wykorzystał wiedzę ogólną z dwóch dyscyplin, efektywnie i skutecznie łącząc ją dla realizacji głównego celu rozprawy. Dlatego jednoznacznie stwierdzam, że rozprawa **wykazala ogólną wiedzę teoretyczną** Kandydata w dyscyplinie „inżynieria lądowa, geodezja i transport”, przez co **spełnia ona warunek określony w art.187 ust.1 ustawy [4]**.

6.2. Ocena umiejętności **samodzielnego prowadzenia pracy naukowej** przez Kandydata

Umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oznacza, że Kandydat potrafi samodzielnie zaplanować, przeprowadzić i zakończyć proces badawczy zgodnie z przyjętymi standardami naukowymi. Obejmuje to zarówno aspekty merytoryczne, jak i organizacyjne. Kandydat skutecznie realizując i finalizując rozprawę doktorską w sposób wystarczający i przekonujący **potwierdził nabycie stosownych kompetencji do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej** zgodnie z oceną w tabeli poniżej:

Lp.	Kompetencje Kandydata	Ocena (opisowa i punktowa w skali 0 – 5 pkt.)
1	Identyfikacja problemu badawczego	Problem skutecznego monitorowania obciążeń eksploatacyjnych (w tym pojazdów przeciążonych) na polskich drogach został zidentyfikowany prawidłowo. Kandydat dostrzegł lukę w wiedzy krajowej i sformułował nowy problem naukowy – stworzenie dokładnego systemu identyfikacji obciążeń w ramach systemu B-WIM. Ocena: 4,0.
2	Przegląd piśmiennictwa	Kandydat samodzielnie wyszukał, wyselekcjonował i przeanalizował źródła naukowe, aczkolwiek z pewnymi brakami. Ocena: 3,5.
3	Sformułowanie hipotez lub celów badawczych	Kandydat jasno określił, co chce zbadać i dlaczego. Identyfikacja celu głównego i uzupełniających celów cząstkowych właściwa. Ocena: 5,0
4	Zaplanowanie metodologii badawczej	Kandydat zastosował metodę atrap obiektów rzeczywistych (symulatorów). Nie przeanalizował możliwości zastosowania rzeczywistych danych z SIP i SMK. Zastosowane techniki i autorskie narzędzia były odpowiednie do badań wybraną metodą. Ocena: 4,5.
5	Przeprowadzenie badań własnych	Kandydat bardzo dobrze zebrał dane jakościowe i ilościowe (wyniki symulacji), przeprowadził eksperymenty numeryczne za pomocą autorskich narzędzi informatycznych, przeprowadził bardzo szerokie obserwacje i analizy. Ocena: 5,0.
6	Analiza wyników i jakość wyciągniętych wniosków	Kandydat samodzielnie zinterpretował wyniki badań własnych i wyciągnął poprawne wnioski. Nie odniósł się jednak w tym zakresie do istniejącej wiedzy. Ocena: 4,0.
7	Przedstawienie wyników w formie naukowej	Kandydat napisał rozprawę (monografię) w sposób przejrzysty, zgodny z zasadami cytowania i etyki naukowej. Ocena: 5,0.
8	Krytyczna ocena własnej pracy	Kandydat dość lakonicznie przedstawił ograniczenia swojej metodologii i możliwe błędy. Wskazał jednak poprawnie kierunki dalszych badań. Ocena: 4,5.
ROZPRAWA		Ocena: 35,5 / 40 pkt. (ok. 89 %)

Poza oceną aspektów merytorycznych rozprawy **wymóg samodzielności w kontekście akademickim** oznacza także, że Kandydat nie jest tylko wykonawcą cudzych pomysłów, ma własny wkład intelektualny w rozwój dyscypliny oraz potrafił działać niezależnie od swojego promotora lub zespołu badawczego.

Oryginalność pomysłu Kandydata, zwłaszcza w zakresie wykorzystania algorytmów uczenia maszynowego do identyfikacji obciążeń eksploatacyjnych sieci drogowej, podkreśliłem już w tej recenzji. Oryginalna i autorska jest także metodyka implementacji tych algorytmów z wykorzystaniem stworzonych przez Kandydata symulatorów. Poszczególne symulatory też są indywidualnymi i autorskimi narzędziami, które można wykorzystać także do badań innych aspektów inżynierii drogowej i/lub mostowej. Właśnie stworzone narzędzia informatyczne oraz sposób ich wykorzystania do rozwiązania postawionego problemu badawczego jest **autorskim wkładem intelektualnym** Kandydata w rozwój przedmiotowej dyscypliny.

Rozprawa doktorska Kandydata powstała **pod kierunkiem doświadczonego promotora oraz promotora pomocniczego**. Za ich cenny wkład w powstanie pracy Kandydat podziękował odpowiednim wpisem na początku rozprawy. Trudno zatem mówić o pełnej samodzielności prowadzenia pracy naukowej przez Kandydata. Bez wątplenia przedmiot rozprawy (pomysł), główne elementy jej oryginalności (zastosowanie SSN), zakres, program badań oraz wnioski końcowe powstały przy zaangażowaniu obu promotorów. Jednakże ze względu na charakter badań naukowych Kandydata (symulacje numeryczne z wykorzystaniem autorskich narzędzi informatycznych), mógł on je wykonywać praktycznie samodzielnie na własnym komputerze. Nie musiał korzystać w tym przypadku ze wsparcia chociażby personelu laboratorium badawczego własnej uczelni. Wszystkie prace informatyczne (pisanie oprogramowania, tworzenie narzędzi informatycznych, wykorzystanie narzędzi do badań, analiza i postprocesing wyników) zostały wykonane samodzielnie przez Kandydata, bo taka jest ich natura.

Samodzielność wykonania rozprawy doktorskiej potwierdzają także wyniki badania antyplagiatowego, dołączone do rozprawy.

Przedstawiona powyżej ocena kompetencji nabytych przez Kandydata potwierdza jednoznacznie **umiejętność samodzielnego prowadzenia przez niego pracy naukowej**, przez co **spełniony jest warunek określony w art.187 ust.1 ustawy [4]**.

6.3. Ocena oryginalnego rozwiązania problemu naukowego.

W recenzowanej rozprawie Kandydat nie sprecyzował problemu naukowego, nie sformułował tezy(y), lecz postawił sobie jeden główny i kilka cząstkowych celów badawczych. Ich analiza pozwala recenzentowi (niejako w zastępstwie Kandydata) na sprecyzowanie problemu naukowego rozprawy jako: **opracowanie sposobu identyfikacji eksploatacyjnych obciążeń drogowych obiektów mostowych z wykorzystaniem auto-adaptacyjnego systemu informatycznego, bazującego na algorytmach uczenia maszynowego**. Kandydat rozwiązał ww. problem naukowy za pomocą indywidualnie zaprojektowanych narzędzi informatycznych.

Oryginalnym rozwiązaniem tak postawionego problemu naukowego jest **koncepcja autorskiego systemu AutoSIO**, którego budowę, implementację, weryfikację i badanie stabilności Kandydat przedstawił w rozprawie. Głównymi cechami rozwiązania, stanowiącymi o jego oryginalności są:

- a) rozwiązanie problemu odwrotnego: określenie całkowitego nacisku pojazdu oraz nacisków poszczególnych osi na podstawie statycznej i/lub dynamicznej odpowiedzi konstrukcji mostowej;
- b) zastosowane autorskich narzędzi informatycznych, wykorzystujących sieci neuronowe: sieci jednokierunkowe (regresja), sieci splotowe (redukcja wymiarowości) oraz autodekodery (odszumianie);
- c) auto-adaptacja (samouczenie, samodoskonalenie) stworzonego systemu osiągnięta za pomocą zastosowania uczenia nienadzorowanego sieci neuronowych;
- d) zastosowane autorskich narzędzi informatycznych do treningu, testowania i badania stabilności stworzonego systemu.

Zarówno podjęta przez Kandydata tematyka badawcza jak również opracowany przez niego indywidualny program numerycznych badań własnych cechują się wysokim stopniem oryginalności, w szczególności w warunkach krajowych, gdzie zarówno tematykę jak i przyjętą metodologię badań (w pewnym zakresie) można uznać za pionierskie. Dlatego jednoznacznie stwierdzam, że rozprawa Kandydata stanowi **oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**, przez co **spełnia ona warunek określony w art.187 ust.2 ustawy [4]**.

7. Ocena możliwości praktycznego zastosowania uzyskanych wyników rozprawy

Możliwość praktycznego zastosowania wyników rozprawy doktorskiej, zrealizowanej w dyscyplinie „*inżynieria lądowa, geodezja i transport*” **jest zdaniem recenzenta koniecznością**. Badania naukowe realizowane w tej dyscyplinie (w tym badania Kandydata) mają najczęściej charakter badań przemysłowych, służących do sprawdzenia i oceny czy dany rodzaj technologii jest przydatny na rynku, w jakim stopniu i jakie można wprowadzić ulepszenia. Badanie te prowadzą zazwyczaj do polepszenia obecnych już na rynku produktów, usług i procesów oraz do tworzenia nowych, innowacyjnych zasobów. Taki charakter mają także badania Kandydata.

Wyniki badań Kandydata są bezpośrednio związane z praktycznymi możliwościami wykorzystania metod uczenia maszynowego (w szczególności sztucznych sieci neuronowych) do identyfikacji drogowych obciążeń eksploatacyjnych (w szczególności ponadnormatywnych) oraz do monitoringu obiektów mostowych. Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych w inżynierii lądowej w Polsce jest jeszcze w fazie badań doświadczalnych, lecz ich wyniki wskazują na możliwość nieodległej komercjalizacji niektórych systemów i narzędzi. Do nich z pewnością należy system opracowany przez Kandydata.

Wyniki badań naukowych Kandydata **mogą mieć zatem praktyczne zastosowanie:**

- a) w identyfikacji pojazdów przeciążonych, umożliwiającej ich skuteczną eliminację z ruchu;
- b) monitorowaniu drogowych obciążeń eksploatacyjnych, pozwalającym na sterowanie ruchem i zarządzanie obiektami mostowymi;
- c) w monitoringu stanu technicznego obiektów mostowych;
- d) do gromadzenia danych niezbędnych do aktualizacji i rozwoju modeli obciążeń mostowych, stosowanych w projektowaniu.

8. Podsumowanie i wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Aleksandra Mroza stanowi **oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**, jakim jest opracowanie sposobu identyfikacji eksploatacyjnych obciążeń drogowych obiektów mostowych z wykorzystaniem auto-adaptacyjnego systemu informatycznego, bazującego na algorytmach uczenia maszynowego. W wyniku opisanych w

rozprawie prac naukowych Kandydat opracował koncepcję autorskiego systemu AutoSIO, którego budowę, implementację, weryfikację i badanie stabilności przedstawił w rozprawie. Opracował także autorską metodę implementacji własnego systemu, opartą na obiektach – atrapach, tworzących symulator obciążeń dynamicznych drogowych obiektów mostowych. Kandydat rozwiązał problem naukowy metodami numerycznymi, wykorzystując opracowane przez siebie nowe narzędzia informatyczne, w szczególności oparte na sztucznych sieciach neuronowych. Dzięki temu opracowany system ma unikalną cechę jaką jest auto-adaptacyjność, pozwalająca na samodoskonalenie systemu bez udziału jego operatora.

Kandydat wykazał i wykorzystał w rozprawie wiedzę ogólną z kilku dyscyplin naukowych, efektywnie i skutecznie łącząc ją dla realizacji celów rozprawy, przez co **wykazał ogólną wiedzę teoretyczną** w szczególności w dyscyplinie „*inżynieria lądowa, geodezja i transport*”. Podczas realizacji rozprawy Kandydat nabył także odpowiednie kompetencje badawcze, które **potwierdzają umiejętność samodzielnego prowadzenia przez niego pracy naukowej**. Jednocześnie ze względu na rosnące zapotrzebowanie administracji drogowej na narzędzia do identyfikacji drogowych obciążeń eksploatacyjnych (w szczególności ponadnormatywnych) oraz do monitoringu obiektów mostowych, wyniki pracy naukowej Kandydata **mają znaczenie praktyczne**.

Reasumując mogę jednoznacznie stwierdzić, że oczywiste walory poznawcze rozprawy, oryginalne rozwiązanie postawionego problemu metodami naukowymi, a także wykazana w pracy ogólna wiedza teoretyczna i umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Kandydata, upoważniają mnie do stwierdzenia, że rozprawa doktorska pt. „*Auto-adaptacyjny system identyfikacji eksploatacyjnych obciążeń drogowych obiektów mostowych z wykorzystaniem uczenia maszynowego*”, **spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim w ustawie [4] oraz do postawienia wniosku o przyjęcie rozprawy doktorskiej** mgr inż. Aleksandra Mroza **oraz o dopuszczenie jej do publicznej obrony**.

Jednocześnie biorąc pod uwagę wysoką oryginalność i innowacyjność przedmiotu rozprawy, profesjonalne przygotowanie i przeprowadzenie badań numerycznych z wykorzystaniem nowych technik obliczeniowych (SNN) i autorskich narzędzi informatycznych oraz duży zakres wykonanych prac naukowych **wnioskuje o wyróżnienie rozprawy doktorskiej** mgr inż. Aleksandra Mroza.



Tomasz Siwowski
Rzeszów, 22.08.2025 r.