

dr hab. inż. Grzegorz Bocewicz, prof. PK  
Wydział Elektroniki i Informatyki  
Politechnika Koszalińska  
ul. Śniadeckich 2  
75-453 Koszalin

Koszalin, 06.12.2023 r.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA  
Biuro Rady Dyscypliny  
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika  
i Technologie Kosmiczne

wpłynęło dnia 13.12.2023

nr ..... zał. ....

## **R e c e n z j a**

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Adriana Olczyka

pt. „**Wielokryterialność i predykcja w planowaniu trajektorii w sieciach komunikacji publicznej**”

### **1. Obszar problemowy rozprawy**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Adriana Olczyka poświęcona jest zagadnieniom modelowania i analizy zachowania Inteligentnych Systemów Transportowych (IST), w których wartości pewnych parametrów nie są dokładnie znane. Doktorant koncentruje się głównie na przypadkach, w których czasy przejazdów środków transportu (autobusy, tramwaje itp.) różnią się od wartości przyjętych przez zadany rozkład jazdy. W rzeczywistych systemach transportowych zwykle dochodzi do opóźnień, których powodem jest kongestia transportowa wynikająca z wielu czynników, tzn.: nieprawidłowo zaprojektowanej struktury systemu transportowego, modernizacji/przebudowy dróg, wypadków drogowych, niekorzystnych warunków pogodowych itp. W problemach analizy zachowania IST główny nacisk kładzie się na planowaniu tras podróży pasażerów, przewidywaniu zaistniałych opóźnień oraz ocenie ich wpływu na realizację zaplanowanych tras.

Tematyka ta jest znana od wielu lat, ale jak się okazuje wciąż bardzo aktualna. O niesłabnącym zainteresowaniu świadczy chociażby liczba publikacji, która w ostatniej dekadzie przekracza 5000 pozycji (*dane wg. bazy Scopus za lata 2013-2023*). Znaczna część literatury przedmiotu poświęcona jest jednak ujęciu, w którym zakłada się deterministyczny charakter rozważanego problemu, tzn. przyjmuje się, że wartości wszystkich parametrów są dokładnie znane (opóźnienia nie występują lub są z góry znane). Unikanie uwzględniania możliwości wystąpienia opóźnień, lub zakładanie ich stałego braku, w procesie planowania tras podróży w IST niesie za sobą istotne ryzyko niepowodzenia, takie jak potencjalne spóźnienia na przesiadkę lub długotrwałe oczekiwanie na przystanku. Dodatkowo może to znacząco obniżyć skuteczność

podejmowanych decyzji oraz jakość opracowywanych planów podróży różniących się z planami referencyjnymi.

Istnieje wiele rozwiązań umożliwiających planowanie tras podróży w systemach klasy IST jednak stosunkowo niewiele z nich umożliwia planowanie proaktywne uwzględniające przewidziane z wyprzedzeniem opóźnienia. Problemy tej klasy wymagają znacznych nakładów obliczeniowych wynikających z konieczności przetwarzania ogromnych ilości danych, wykluczających możliwości obliczeniowe aktualnie dostępnych metod i narzędzi. Warto zauważyć, że stopień „trudności” tego typu problemów rośnie wraz z liczbą uwzględnianych w ich modelach czynników tj.: dane historyczne, pora roku, rodzaj środka transportu, położenie pojazdu, pogoda, dzień tygodnia, trasa pojazdu, aktualne natężenie ruchu itp. Możliwość „właściwego” planowania tras podróży, jest warunkowana dokładnością predykcji możliwych opóźnień wykorzystywanych środków transportu.

Odpowiedni sposób modelowania IST integrujący proces planowania z procesem predykcji opóźnień może pozwolić na redukcję rozmiaru danych i przyspieszyć prowadzenie obliczeń. Przedstawiona możliwość zmniejszenia złożoności obliczeniowej stanowi główną motywację opracowania autorskiego modelu IST i budowy czasowo efektywnych algorytmów planowania tras pasażerów, leżących u podstaw prowadzonych przez Doktoranta badań.

W tym ujęciu opiniowana rozprawa koncentruje się na zagadnieniach predykcji opóźnień i w konsekwencji proaktywnego planowania tras w systemach klasy IST. Rozważany w dysertacji problem można zrekonstruować w następujący sposób. Dane są: struktura sieci transportowej IST, liczba linii pasażerskich, rozkłady jazdy. Stan sieci (możliwość występowania opóźnień) oceniany jest na podstawie szeregu dostępnych parametrów tj.: dane historyczne, pozycje pojazdów (współrzędne GPS), warunki atmosferyczne, natężenie ruchu itp. Poszukiwana jest trasa podróży między wybranymi punktami sieci spełniająca wybrane kryteria takie jak: minimalny czas podróży, minimalna długość tras, zadany koszt podróży, maksymalna liczba przesiadek oraz czas trwania przesiadki itp. Dla tak zdefiniowanego problemu prowadzone są poszukiwania modelu IST oraz algorytmów predykcji opóźnień i marszrutyzacja tras zapewniających efektywne planowanie podróży pasażerów.

Uważam, że opiniowana rozprawa, podejmuje ważny i aktualny problem naukowy. Elementy nowości przejawiają się w autorskim modelu IST oraz algorytmach planowania tras i predykcji opóźnień. Podjęcie przedstawionej problematyki jest uzasadnione zarówno ze względów poznawczych, jak i możliwości wielu praktycznych zastosowań związanych m.in. z rzeczywistymi systemami proaktywnego planowania podróży.

## 2. Kompozycja i treść rozprawy

Opiniowana rozprawa liczy 157 stron i składa się z 6 rozdziałów, wykazu cytowanej literatury liczącego 104 pozycje, oraz spisów stosowanych symboli, skrótów, oznaczeń, rysunków i tabel. Załączona lista źródeł bibliograficznych obejmuje ważniejsze pozycje literaturowe z zakresu przedmiotu pracy. Warto podkreślić, że w bibliografii występuje 6 współautorskich publikacji Doktoranta (publikacje wydane jako materiały krajowych i międzynarodowych konferencji).

W rozprawie wyodrębnić można trzy zasadnicze części. W części pierwszej (rozdział 1) sformułowano tezę rozprawy, jej cel oraz zakres. Zarówno cel, jak i teza rozprawy zostały sformułowane poprawnie. Lektura rozdziału pozostawia jednak pewien niedosyt odczuwalny w zakresie opisu przyjętych założeń. Poza krótką informacją zamieszczoną w sekcji „Zakres” brakuje szerszego opisu przyjętego do rozważań „systemu transportu publicznego”. Przykładowo nie wiadomo, jakich aglomeracji miejskich dotyczy model prezentowany w dalszych rozdziałach rozprawy. Brakuje również informacji na temat rodzaju rozważanych środków transportu (tramwaj zachowuje się inaczej niż pociąg linii metra), jak i uwzględnianych rodzajów zakłóceń (zjawisk wpływających na czas podróży). W efekcie nie wiadomo dla jakich instancji systemów klasy IST opracowane rozwiązania mogą być skutecznie stosowane.

W części drugiej (rozdziały 2-3) przedstawiono podstawowe pojęcia i stan wiedzy z zakresu predykcji opóźnień oraz metod planowania trajektorii w sieciach drogowych. W rozdziale 2 omówiono 7 metod predykcji: *metodę bieżącej propagacji opóźnień*, *metodę historycznego średniego czasu podróży*, *metodę bazującą na sieci neuronowej (ANN)*, *metodę bazującą na maszynie wektorów podpierających (SVN)*, *regresji liniowej*, *metodę bazującą na filtrze Kalmana*, *metodę hybrydową (rozwiązanie autorskie)*. Przyjęta formuła prezentacji jest w większości przypadków jasna i precyzyjna, miejscami jednak brakuje autorskiego komentarza argumentującego wybór przyjętych do rozważań metod (w literaturze istnieje szereg metod, z których doktorant wybrał tylko 6). Nie wiadomo na przykład, jakie powody legły u podstaw wyboru zaproponowanej autorskiej metody hybrydowej stanowiącej kompozycję tylko dwóch z nich: *bieżącej propagacji opóźnień* oraz *metody bazującej na sieci neuronowej*. Być może jeszcze lepszych rezultatów można spodziewać się z kompozycji 3, 4 albo nawet wszystkich 6 analizowanych metod? W przeprowadzonym przeglądzie brakuje również odniesienia do metod wykorzystywanych w komercyjnych systemach planowania podróży. Przykładowo zgodnie z deklaracją producentów polskiego planera podróży komunikacją publiczną: *jakdojade*

(<https://jakdojade.pl>): „Aplikacja znajduje optymalne połączenia komunikacyjne, uwzględniając przesiadki, opóźnienia pojazdów, zmiany w rozkładach, czasy przejść pieszo i wiele innych parametrów”.

W rozdziale 3 omówiono z kolei, 3 grafowe modele sieci komunikacji miejskiej: *model oparty na wydarzeniach*, *model zależny od czasu*, *model stacji (rozwiązanie autorskie)* oraz przedstawiono dwa algorytmy wyszukiwania połączeń: *algorytm Dijkstry*, *Algorytm A\**.

Wymienionym wyżej metodom poświęcono dużo uwagi, jednak najciekawszym elementem tej części rozprawy (w mojej opinii niewystraszająco wyeksploatowanym) jest sekcja 3.6.3, w której Doktorant proponuje autorską reprezentację sieci komunikacji miejskiej tzw. *model stacji*. W odróżnieniu od znanych dotychczas modeli, opracowana reprezentacja charakteryzuje się niewielką liczbą węzłów. Redukcja liczby węzłów pozwala na znaczne przyspieszenie obliczeń, co jest szczególnie istotne dla systemów o skali spotykanej w praktyce. Niedosyt jednak budzi brak formalnego (matematycznego) opisu zaproponowanej reprezentacji. Stosowny opis, umożliwiłby, po pierwsze przeprowadzenie analizy własności charakterystycznych dla zaproponowanej reprezentacji (np. własności potwierdzających uzyskane w trakcie eksperymentów wyniki), a po drugie pozwoliłby określić ramy zastosowań opracowanego modelu (tzn. określić graniczne parametry sieci, dla których zaproponowana reprezentacja jest lepsza od istniejących).

W części trzeciej (rozdziały 4-5) przedstawiono plan przeprowadzonych eksperymentów obliczeniowych oraz uzyskane wyniki. Przeprowadzone eksperymenty umożliwiły porównanie wybranych metod i modeli zarówno dla sieci wygenerowanych automatycznie, jak i dwóch sieci rzeczywistych:

- sieci komunikacji miejskiej MPK we Wrocławiu,
- sieci komunikacji miejskiej funkcjonującej na Śląsku (Zarząd Transportu Metropolitalnego ZTM).

Przeprowadzone eksperymenty potwierdziły przewagę zaproponowanego *algorytmu hybrydowego* (predykcja opóźnień) oraz *modelu stacji*. Ich integracja, w postaci Zintegrowanego Inteligentnego Systemu Transportowego (ZITS), pozwala na efektywne wyszukiwanie marszrut w zbiorze takich kryteriów jak: minimalizacja liczby przesiadek, minimalizacja czasu przesiadki, minimalizacja prawdopodobieństwa nieudanej przesiadki itp. Należy podkreślić, że przyjęty sposób narracji tej części rozprawy świadczy o dobrym przygotowaniu i wysokich kompetencjach Doktoranta. Pewnym niedostatkim jest brak zestawienia potencjalnych pytań rutynowych (stawianych zarówno od strony użytkownika tego typu systemu, jak i jego dyspo-

zytora), na które opracowany system jest w stanie udzielać odpowiedzi. Uważam, że prezentacja zbioru tego typu pytań pozwoliłoby lepiej określić zakres użyteczności zaprojektowanego systemu.

### 3. Oryginalne osiągnięcia

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy, wyróżniających je spośród dostępnych w literaturze przedmiotu, można zaliczyć:

1. Opracowanie autorskiego modelu sieci komunikacji miejskiej: *model stacji*, umożliwiającego redukcję liczby węzłów koniecznych do wyznaczenia tras podróży.
2. Przeanalizowanie szeregu metod predykcji opóźnień i zaproponowanie autorskiej wersji metody hybrydowej.
3. Zaplanowanie oraz przeprowadzenie szeregu eksperymentów i analiz porównawczych weryfikujących efektywność opracowanych algorytmów w rzeczywistych sieciach komunikacji miejskiej.

Uwzględniając wymienione osiągnięcia naukowe uważam, że Doktorant zrealizował cel rozprawy. Uzyskane rezultaty potwierdzają kompetencje Doktoranta w obszarach z zakresu modelowania problemów planowania tras w sieciach komunikacji miejskiej, technik programowania, a także planowania eksperymentów komputerowych. Dowodzą również, że Doktorant potrafi podejmować i samodzielnie realizować zaplanowane cele badawcze.

### 4. Uwagi i komentarze dotyczące rozprawy

#### Uwagi ogólne:

1. Przedstawione w rozdziałach 4-5 eksperymenty ilustrują możliwości opracowanych metod w zakresie analizy aktualnego stanu sieci komunikacyjnej. Intersującym staje się pytanie, w jakim stopniu opracowany model oraz stojąca za nim metoda mogą zostać wykorzystane przy wsparciu procesu projektowania (aktualizacji) rozkładów jazdy, tak aby mogły skutkować mniejszymi opóźnieniami?
2. Przeprowadzona w rozdziale 2 analiza ogranicza się do metod predykcji zakładających precyzyjną reprezentację wartości opóźnień np. *opóźnienie wynosi 89 s*. W praktyce wartości te są zwykle wyrażane w sposób nieprecyzyjny np. *opóźnienie wynosi około 1 min*. Wydaje się więc, że naturalnym opisem tych wielkości są reprezentacje nieprecyzyjne



typowe dla reprezentacji rozmytych. A zatem: Czy prowadzone badania zakładały możliwość wykorzystania modeli rozmytych do opisu opóźnień w sieciach komunikacji miejskiej?

3. Jednym z analizowanych kryteriów efektywności było prawdopodobieństwo nieudanej przesiadki. Czy oprócz prawdopodobieństwa zajścia tego typu zdarzenia analizowane były również jego skutki? Łatwo można wyobrazić sobie sytuację, w której przesiadka dotyczy ostatniego połączenia danego dnia. Spóźnienie na taką przesiadkę skutkuje utratą możliwości dalszej podróży, co jest zwykle nieakceptowalne przez pasażerów.

#### **Uwagi szczegółowe.**

1. Część rysunków rozdziałów 2-3 nie posiada legendy i opisu stosowanych oznaczeń - przyjęcie takiego sposobu prezentacji wyników utrudnia lekturę pracy.
2. W rozprawie często występują błędy językowe np.: są wspomniane Inteligentnego Systemu Transportowego (str. 2); rozdział 2 mówi od problemie predykcji (str. 5); Matematycznie sformułowanie SVM (str. 13); suma wag krawędzi będzie najtańsza (str. 24); węzłów na przestanku (str. 37), algorytm porusza się po grafie (antropomorfizm, str. 45), itp.

Pomijając powyżej wymienione uwagi należy zaznaczyć, że rozprawa jest zredagowana starannie, posiada właściwą strukturę i proporcje.

#### **5. Konkluzja**

Reasumując stwierdzam, że w recenzowanej rozprawie doktorskiej pana mgr. inż. Adriana Olczyka rozwiązany został oryginalny problem badawczy, polegający na opracowaniu autorskiego modelu sieci komunikacji miejskiej oraz algorytmów predykcji opóźnień i wyznaczania tras zapewniających efektywne planowanie podróży pasażerów. Doktorant wykazał się znajomością podstawowej literatury przedmiotu rozprawy, umiejętnościami modelowania dyskretnych systemów zdarzeniowych, komputerowej implementacji opracowanych metod, a także umiejętnościami prowadzenia eksperymentów obliczeniowych.

Uważam, że recenzowana praca doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z Ustawą o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. z 2017 r. poz. 1789), oraz zgodnie z Ustawą z 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1669 z póź. zm.) w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie

**automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne** i wnoszę o przyjęcie rozprawy i jej dopuszczenie do publicznej obrony.

*Gregorz Bocuś*