

Warszawa, 23.03.2022 r.

dr hab. inż. Michał Kłodawski, prof. uczelni  
Politechnika Warszawska  
Wydział Transportu  
ul. Koszykowa 75  
00-662 Warszawa

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**  
**mgra inż. Jana Hipolita Aleksandrowicza**  
**pt. „Modele optymalizacji przydziału taboru do linii miejskiego**  
**transportu zbiorowego”**

---

**1. Podstawa opracowania recenzji**

---

Podstawą wykonania recenzji rozprawy doktorskiej mgra inż. Jana Hipolita Aleksandrowicza pt. *„Modele optymalizacji przydziału taboru do linii miejskiego transportu zbiorowego”* było powołanie mnie na jej recenzenta w dniu 19 stycznia 2022 r. uchwałą Rady Naukowej Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej oraz pismo Dziekana Wydziału, prof. dr. hab. inż. Andrzeja Szaraty z dnia 21 stycznia 2022 r., zlecające opracowanie niniejszej recenzji.

---

**2. Ogólna charakterystyka rozprawy**

---

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgra inż. Jana Hipolita Aleksandrowicza pt. *„Modele optymalizacji przydziału taboru do linii miejskiego transportu zbiorowego”*. Praca została zrealizowana na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej. Jej promotorem jest prof. dr hab. inż. Wiesław Starowicz oraz dr inż. Daniel Kubek (promotor pomocniczy).

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje 187 stron. Składa się ze streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu treści, spisu skrótów i oznaczeń, 6 rozdziałów, w tym wprowadzenia i podsumowania, bibliografii, spisu rysunków, spisu tabel, oraz 3 załączników. W treści rozprawy Autor odnosi się do 221 pozycji literaturowych, w tym do 6 własnych artykułów opublikowanych w języku polskim i angielskim (z czego trzy to publikacje autorskie w języku polskim). W pracy zawarto

D Z I E K A N A T	
Wydziału Inżynierii Lądowej	
Wpłynęło dnia...	104. 2022
L. dz.	LO.510.1.2. 2022
podpis...	<i>[signature]</i>

31 rysunków i 23 tabele. Materiał ilustracyjny, tabele i wzory zostały ponumerowane oraz odpowiednio opisane w treści pracy.

Streszczenie pracy w sposób syntetyczny przybliży tematykę rozprawy, jej zakres oraz uzyskane efekty. W zasadniczej treści dysertacji można wyróżnić dwie części – teoretyczną i praktyczną. W ramach pierwszej z nich omówiono znaczenie przydziału taboru do linii w miejskim transporcie zbiorowym oraz zidentyfikowano aktualny stan badań w analizowanej tematyce. W części praktycznej opracowano autorskie modele matematyczne służące do wielokryterialnej optymalizacji przydziału taboru do brygad w transporcie zbiorowym, jak również zaprezentowano ich implementację komputerową z wykorzystaniem algorytmów genetycznych i zachłannych. W tej części dokonano również testów opracowanych modeli i ich implementacji komputerowej na danych rzeczywistych. Dysertacja kończy się analizą uzyskanych wyników oraz podsumowaniem i wnioskami wynikającymi z przeprowadzonych prac badawczych.

Do pracy dołączono 3 załączniki, o łącznej objętości 24 stron, zawierające podstawowe dane wejściowe dotyczące krakowskiego systemu transportu zbiorowego, wykorzystywanego tam taboru (załącznik 1 i 2) oraz analizowane w dysertacji kombinacje wartości wag kryteriów cząstkowych modeli optymalizacyjnych (załącznik 3).

---

### **3. Ocena rozprawy**

---

#### **3.1. Struktura pracy i podział treści**

Recenzowana rozprawa doktorska rozpoczyna się wprowadzeniem, w którym Doktorant wskazuje i krótko charakteryzuje cztery zasadnicze problemy miejskich systemów transportu zbiorowego, tj.: nierównomierność wykorzystania miejsc w kursujących pojazdach, wzrost kosztu wykonywania kursów, zanieczyszczenie powietrza przez środki transportu oraz zmieniające się parametry infrastruktury transportowej. Sugeruje równocześnie, iż ich rozwiązanie możliwe będzie dzięki wykorzystaniu narzędzi służących do obserwowania aktualnych potrzeb pasażerów oraz dopasowaniu do nich elementów systemu transportu miejskiego, uwzględniając koszty funkcjonowania systemu, jego wpływ na środowisko oraz dostosowanie do stanu infrastruktury. Tak postawiona teza wynika z doświadczeń Doktoranta zaprezentowanych w genezie podjęcia tematu dysertacji. W ramach wprowadzenia

przedstawiono również cel pracy i krótko scharakteryzowano jej zakres. Ocena celu pracy zawarta została w kolejnych etapach recenzji.

W pierwszym zasadniczym rozdziale dysertacji przybliżono tematykę przydziału taboru do linii w miejskim transporcie zbiorowym. Główna uwaga zwrócona została na znaczenie tego problemu, jego uwarunkowania oraz metody i narzędzia wykorzystywane do poszukiwania rozwiązań optymalnych. W tej części pracy Doktorant omawia i zapisuje formalnie klasyczne zagadnienie przydziału oraz wskazuje metody jego rozwiązania. Szczególna uwaga zwrócona została na metody heurystyczne, a dokładnie algorytmy genetyczne i zachłanne. Zasadność ich wykorzystania na potrzeby analizowanego problemu Doktorant popiera przykładami z literatury. W rozdziale pierwszym przybliżane są również inne aspekty związane z tematyką przydziału taboru do linii w miejskim transporcie zbiorowym, tj.: metody pozyskiwania informacji o liczbie przewożonych pasażerów, energochłonności taboru i jego emisyjności. W tej części Doktorant identyfikuje i omawia wpływ różnych czynników na wspomnianą energochłonność i emisyjność środków transportu zbiorowego, a w szczególności: pogody, profilu podłużnego trasy czy liczby zatrzymań na trasie. Wskazuje tym samym na złożoność i wielowymiarowość rozwiązywanego problemu badawczego.

Drugi rozdział dysertacji dotyczy przeglądu literatury na temat modeli przydziału taboru w transporcie zbiorowym. Na jego podstawie Doktorant sformułował definicję przydziału taboru:

*(...) przydział taboru to proces polegający na przypisywaniu typu lub konkretnego pojazdu do realizacji ściśle określonego zadania. Przydział taboru realizowany jest na podstawie danych dotyczących zadania, jakie ma zostać wykonane i parametrów technicznych dostępnego taboru (...)*

W tej części pracy główna uwaga Autora skupiona została na modelach optymalizacyjnych. Na pochwałę zasługuje zidentyfikowanie wielu różnorodnych podejść badaczy do analizowanego zagadnienia i pogrupowanie ich oraz porównanie ze względu na cele badawcze, ograniczenia i parametry jakie uwzględniano (w sumie ok. 65 źródeł literaturowych). W wyniku przeprowadzonego przeglądu literatury Doktorant wysnuwa wnioski, sugerujące iż w zidentyfikowanych pracach badawczych:

- nie uwzględniano danych rzeczywistych pozyskiwanych w sposób ciągły i automatyczny,

- nie uwzględniano oczekiwań organizatora miejskiego transportu zbiorowego jako kryterium modelowania,
- nie uwzględniano jednocześnie takich kryteriów jak: komfortu podróży, wykorzystania środków transportu, energochłonności środków transportu, emisji szkodliwych substancji.

W dalszej części rozdziału drugiego dokonano przeglądu literatury dotyczącego sposobów szacowania danych, charakterystyk i kryteriów jakie badacze wykorzystują na potrzeby przydziału środków do zadań w transporcie zbiorowym.

Podsumowując identyfikację stanu wiedzy w analizowanej problematyce Doktorant zauważa lukę badawczą jaką chciałby wypełnić, a w szczególności:

- opracowanie uniwersalnych modeli mających zastosowanie dla dowolnego systemu transportu zbiorowego (miasto, tabor).
- opracowanie modeli wykorzystujących szczegółowe charakterystyki z pomiarów ciągłych popytu, energochłonności taboru i wielkości emisji szkodliwych substancji zamiast danych uśrednionych,
- opracowanie modeli przydziału taboru dla pojedynczych dni, z uwzględnieniem danych dziennych, a nie średnich okresowych.

Rozdział trzeci poświęcony jest autorskim modelom optymalizacji przydziału taboru. Doktorant prezentuje tam ogólne założenia do modelowania analizowanego problemu. Pierwszym i zasadniczym założeniem jest to, iż opracowane zostaną trzy modele:

- model oparty na przydziale wyłącznie pojazdów spalinowych,
- model oparty na przydziale wyłącznie pojazdów elektrycznych,
- model hybrydowy oparty na przydziale zarówno pojazdów spalinowych jak i elektrycznych.

Jest to trochę niezrozumiałe i nadmiarowe. Skupienie uwagi jedynie na modelu hybrydowym, w którym przy pomocy ograniczeń możliwe jest (w razie konieczności) wyeliminowanie z przydziału pojazdów elektrycznych bądź spalinowych moim zdaniem byłoby wystarczające i w pełni funkcjonalne.

W dalszej części dokonano identyfikacji i parametryzacji elementów modeli, tj.: taboru miejskiego transportu zbiorowego, zadań przewozowych, charakterystyk tras brygad, organizacji przydziału taboru. Doktorant określił również zmienne decyzyjne i ograniczenia dla poszczególnych typów opracowywanych modeli. Kluczowe w tej



części były kryteria oceny przydziału środków do zadań. Sformułowano cztery kryteria częściowe:

- kryterium komfortu podróży i wykorzystania przepustowości pojazdów,
- kryterium energochłonności taboru,
- kryterium wielkości emisji szkodliwych substancji (tylko dla systemów, w których kursują pojazdy spalinowe),
- kryterium oczekiwań organizatora miejskiego transportu zbiorowego.

Sformułowane zmienne decyzyjne, ograniczenia i kryteria zostały zestawione w trzy modele optymalizacyjne wspomnianych wcześniej typów. Jak wskazuje Doktorant mogą one być wykorzystane do przydziału taboru dla całego analizowanego systemu transportu zbiorowego oraz w celu testowania zmian w przydziale taboru poprzez modelowanie ich wpływu na wyniki końcowe.

W kolejnym, czwartym rozdziale dysertacji omówiono implementację komputerową opracowanych modeli, nazywaną dalej jako program komputerowy do wspomagania decyzji w procesie optymalizacji przydziału taboru. Przedstawiono tam architekturę programu, projekt bazy danych, interfejs użytkownika i ogólny schemat działania aplikacji. W tej części pracy Doktorant omówił także sposób wykorzystania algorytmu genetycznego oraz zachłannego do rozwiązania problemu optymalizacyjnego. Po prezentacji implementacji komputerowej przedstawiono sposób realizacji testów opracowanych modeli optymalizacyjnych i uzyskane w ten sposób wyniki. Testy przeprowadzono z wykorzystaniem danych rzeczywistych z krakowskiego systemu miejskiego transportu zbiorowego. Wyniki obliczeń dla różnych wariantów wag kryteriów częściowych zestawiono z rzeczywistym przydziałem taboru do brygad. Jak wskazuje Doktorant, niezależnie od przyjętych wag, wartość funkcja kryterium dla przydziału z wykorzystaniem opracowanych modeli była lepsza niż w przypadku przydziału rzeczywistego. Dodatkowo, w wyniku przeprowadzonych testów zauważono, iż:

- wartość akceptowalnego napełnienia pojazdu nie ma znaczącego wpływu na wynik przydziału pojazdów (założono, iż w dalszych badaniach będzie on miał wartość 0,6).
- wykorzystanie opracowanych modeli i narzędzia informatycznego pozwala na uzyskanie poprawy wartości kryteriów przydziału taboru od kilku do nawet 20%

(zróżnicowane wartości w zależności od wykorzystanego algorytmu i liczności dostępnych danych),

- wykorzystanie opracowanych modeli i narzędzia informatycznego pozwala na zredukowanie zużycia paliwa i energii oraz emisji substancji szkodliwych dla środowiska,
- wykorzystanie opracowanych modeli i narzędzia informatycznego nie pozwoliło na poprawę rozwiązania problemu przydziału wg kryterium czwartego (oczekiwań organizatora transportu miejskiego) względem przydziału rzeczywistego.

W rozdziale 5 dysertacji Doktorant przedstawił podsumowanie przeprowadzonych rozważań i odniósł się do celu rozprawy, sformułował wnioski, a także nakreślił kierunki dalszych badań.

Strukturę rozprawy oceniam pozytywnie choć zauważam w niej drobne mankamenty. Tytuły kolejnych rozdziałów w większości przypadków odpowiadają zawartej w nich treści i w sposób logiczny prezentują kolejne etapy prowadzonych badań, zmierzające do osiągnięcia sformułowanego celu rozprawy. Jednak moim zdaniem tytuł rozdziału pierwszego - „Znaczenie przydziału taboru do linii w miejskim transporcie zbiorowym” nie do końca jest precyzyjny. W rozdziale tym zawartych jest wiele różnych aspektów niezbędnych do uwzględnienia w modelowaniu przydziału środków do zadań transportu miejskiego. Jednak nie zawsze odnoszą się one bezpośrednio do znaczenia tego przydziału. Uważam również, iż wprowadzenie, geneza podjęcia tematu, cel pracy i jej zakres mogłyby być pierwszym numerowanym rozdziałem, który wprowadzałby czytelnika w tematykę pracy. Zaprezentowany na początku pracy wykaz wszystkich skrótów i oznaczeń w rzeczywistości pomija wiele z tych oznaczeń co znacząco utrudnia analizę i ocenę zaprezentowanych w pracy formalnych sformułowań problemu. Oznaczenia te mogłyby również być uszeregowane alfabetycznie co przyspieszyło by ich odnalezienie i identyfikację.

Pomimo powyższych, drobnych uwag uważam, że **przyjęta struktura pracy jest w większości prawidłowa i w sposób właściwy prezentuje podjęty problem badawczy, sposób jego rozwiązania i uzyskane rezultaty.**

### **3.2. Dobór tematu i sformułowanie celu rozprawy**

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska poświęcona jest problematyce przydziału taboru do obsługi miejskiego transportu zbiorowego. W prowadzonych

rozważaniach Doktorant uwzględnia wiele aspektów związanych z tym zagadnieniem, w tym: identyfikację rzeczywistego popytu na usługi przewozowe, szacowanie zużycia energii przez środki transportu, szacowanie wielkości emisji substancji szkodliwych przez transport miejski oraz dostosowanie się do oczekiwań organizatora miejskiego transportu zbiorowego.

Nieustający od wielu lat przyrost ludności prowadzi do coraz szybszego rozrostu miast. Zgodnie z doniesieniami ONZ w 2050 roku ponad dwie trzecie ludności świata zamieszkiwać będzie miasta i obszary znajdujące się w ich najbliższym otoczeniu. Niesie to za sobą pojawianie się w ich obszarze nowych i coraz bardziej złożonych problemów transportowych i komunikacyjnych. Należy przy tym pamiętać, że zapewnienie transportu i odpowiedniej mobilności mieszkańcom jest jednym z najważniejszych czynników, które określają poziom rozwoju gospodarczego, społecznego i technicznego miasta, a także jego atrakcyjność dla mieszkańców.

Ewoluujące potrzeby osób zamieszkujących miasta doprowadziły do wzrostu zapotrzebowania na indywidualne środki transportu. Tego konsekwencją są zatknięcia i zatory w sieci drogowej. Ma to negatywny wymiar ekonomiczny i społeczny, jak również prowadzi do zwiększonej emisyjności miast i wynikającego z tego zanieczyszczenia środowiska. Naturalnym rozwiązaniem tego problemu wydaje się zachęcenie użytkowników miast do korzystania z miejskiego transportu zbiorowego. Zmiana nawyków i upodobań transportowych mieszkańców miast może jednak okazać się niezwykle trudnym i karkołomnym zadaniem. W celu zwiększenia atrakcyjności transportu zbiorowego niezbędne jest odpowiednie jego zorganizowanie i skonfigurowanie, tak aby spełniał oczekiwania i potrzeby mieszkańców, a jednocześnie był odpowiednio tani i przyjazny dla środowiska oraz akceptowalny z punktu widzenia oczekiwań organizatora transportu miejskiego. Jednym ze sposobów zrealizowania tego zadania jest racjonalny dobór typów środków transportu do miejskich linii komunikacyjnych, uwzględniając przy tym komfort pasażerów, emisyjność środków transportu jak również ich energochłonność. Tym samym wszelkie badania prowadzące do racjonalizacji i optymalizacji przydziału środków do zadań transportowych w komunikacji miejskiej są zasadne zarówno z naukowego jak i praktycznego punktu widzenia. **Uważam zatem, że sformułowany przez Doktoranta cel naukowy rozprawy tj.: opracowanie modelu dla wielokryterialnego wspomagania decyzji w problemie optymalizacji przydziału taboru do obsługi miejskich linii transportu zbiorowego z uwzględnieniem rzeczywistego popytu na usługi**

*przewozowe, zużycia energii i emisji szkodliwych substancji oraz oczekiwań organizatora miejskiego transportu zbiorowego jest trafny i poprawnie określony.*

Ze względu na wielowymiarowość problemu przydziału środków do zadań w transporcie miejskim, jego zależność od szerokiego spektrum czynników i wynikającą z tego dużą złożoność obliczeniową **za zasadny i poprawny uważam również cel praktyczny dysertacji**, a mianowicie: *opracowanie efektywnej algorytmicznie metody heurystycznej dla rozwiązywania problemu przydziału taboru do obsługi linii transportu zbiorowego uwzględniającej rzeczywiste uwarunkowania funkcjonowania sieci transportu zbiorowego*. W tym punkcie należy zwrócić także uwagę na fakt, iż w dysertacji nie zdefiniowano pojęcia efektywności algorytmicznej metody. Przez to problematyczne może okazać się jednoznaczne ocenienie czy cel ten został w pełni osiągnięty.

**Podsumowując uważam, że dysertacja pt.: *Modele optymalizacji przydziału taboru do linii miejskiego transportu zbiorowego* wpisuje się w zagadnienia dotyczące optymalizacji transportu zbiorowego, mobilności miejskiej i zrównoważonego rozwoju, a podjęty temat jest aktualny i ważny zarówno z naukowego jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Zakres pracy uwzględnia wiele istotnych czynników warunkujących atrakcyjność, opłacalność i ekologiczność miejskiego transportu zbiorowego. Został on właściwie zdefiniowany i pozwala na osiągnięcie sformułowanych celów.**

### **3.3. Dobór metod do rozwiązania podjętych zagadnień badawczych**

Autor rozprawy podjął się ambitnego zadania mającego na celu wielokryterialny dobór taboru do realizacji zadań w zbiorowym transporcie miejskim. Do jego realizacji zaproponował autorską metodę opartą na opracowanych przez Doktoranta modelach optymalizacyjnych. Metoda ta cechuje się dużą uniwersalnością pod względem danych, niezbędnych do realizacji badań. Umożliwia ona wykorzystanie dużych zbiorów danych rzeczywistych, zbieranych automatycznie w sposób ciągły lub też danych pozyskiwanych z pomiarów klasycznych. Tym samym może być ona stosowana do optymalizacji przydziału taboru do linii niezależnie od wielkości miejskiego systemu transportu zbiorowego oraz źródła danych wejściowych. Na uwagę zasługuje również fakt, iż Doktorant w opracowanej metodzie uzmiennił koszty wykonania kursów w miejskim transporcie zbiorowym, uzależniając je od profilu podłużnego trasy, liczby zatrzymań pojazdu na trasie oraz warunków pogodowych.

Opierając się na literaturze problemu wykorzystał prezentowane tam sposoby wyznaczania współczynników wpływu powyższych czynników na zużycie paliwa i energii elektrycznej oraz wielkość emisji szkodliwych substancji.

Wybór odpowiedniego algorytmu optymalizacji przydziału taboru do zadań transportowych Doktorant poprzedził przeglądem literatury. Ze względu na dużą złożoność analizowanego problemu zaproponował wykorzystanie metod heurystycznych. Główna jego uwaga skupiona została na algorytmach genetycznych i zachłannych. Opierając się na doniesieniach literatury i wynikach prac zaprezentowanych w dysertacji algorytmy te można oczywiście uznać za poprawne i odpowiednie do rozwiązywania tej klasy problemów badawczych. Należy jednak zaznaczyć, iż istnieje wiele innych metod heurystycznych możliwych do zastosowania. W pracy zabrakło moim zdaniem bardziej szczegółowego przeglądu tych metod, identyfikacji ich wad, zalet i zasadności ich zastosowania.

**Podsumowując, przyjętą metodę badań oraz opracowanie poszczególnych jej elementów oceniam pozytywnie. Działania podjęte przez Doktoranta pozwoliły na przeprowadzenie rozważań zmierzających do osiągnięcia celu pracy i są adekwatne do sformułowanego problemu badawczego. Autor wykazał się dużą wiedzą i umiejętnościami w zakresie modelowania matematycznego oraz weryfikacji i analizy danych dotyczących miejskiego transportu zbiorowego. Potrafi krytycznie ocenić uzyskane rezultaty i wyciągać konstruktywne wnioski. W mojej ocenie świadczy to o dojrzałości naukowej Doktoranta i samodzielności w prowadzeniu badań naukowych.**

### **3.4. Analiza literaturowa, dobór i sposób wykorzystania źródeł**

Przedstawione w pracy studia literaturowe są obszerne i tematycznie spójne z poruszaną w dysertacji problematyką. Bibliografia zawiera 221 pozycje literatury i niemal wszystkie to publikacje naukowe. Wśród nich ok 53% to publikacje w języku angielskim, a 34% to publikacje opublikowane w ostatnich pięciu latach. Wykorzystana literatura jest więc stosunkowo aktualna i stanowi cenny zbiór porządkujący wiedzę z zakresu szeroko pojętego modelowania miejskiego transportu zbiorowego i zagadnień pokrewnych.

Wśród cytowanej literatury znalazło się sześć prac Doktoranta, w tym 3 autorskie oraz jedna w języku angielskim. Wskazuje to, iż Autor od dłuższego czasu zajmuje się naukowo analizowaną w pracy problematyką (co dodatkowo prezentuje w genezie

podjęcia tematu dysertacji) i na bieżąco publikuje wyniki swoich badań. Duża znajomość podjętego tematu pozwala Doktorantowi swobodnie poruszać się w różnych zagadnieniach związanych z modelowaniem miejskiego transportu zbiorowego. Sprawnie przedstawia On szeroki zakres czynników i zagadnień jakie należy uwzględnić na potrzeby optymalnego przydziału środków transportowych do linii komunikacji miejskich, m.in.: problematykę pozyskiwania danych nt. popytu na przewóz, energochłonności środków transportu miejskiego, emisyjności środków transportu miejskiego.

Zasadnicza część dotycząca przeglądu literatury została zawarta w rozdziale 2, gdzie dokonano przeglądu modeli przydziału taboru. Również rozdziale 1 zidentyfikowano wiele pozycji literatury, które dotyczą wpływu różnych czynników na energochłonność i emisyjność środków transportu, w tym pogoda, pora roku, profil podłużny trasy, liczba zatrzymań na trasie, itp..

Doktorant trafnie wyciąga wnioski na podstawie studiów literaturowych, potrafi analizować i krytycznie oceniać aktualny stan badań. Dowodem na to jest zidentyfikowana luka badawcza dotycząca braku modeli przydziału środków do zadań transportu miejskiego wykorzystujących szczegółowe charakterystyki popytowe, pochodzące z pomiarów ciągłych, a także uwzględniających energochłonność taboru i wielkość emisji szkodliwych substancji.

**W mojej ocenie przegląd jest dokładny i adekwatny do podjętej tematyki. Pozwolił Doktorantowi na zgromadzenie niezbędnej wiedzy oraz przyjęcie właściwej metody rozwiązania podjętych zagadnień badawczych, a tym samym osiągnięcie celu pracy i zwiększenie wiedzy w obszarze zidentyfikowanej luki badawczej.**

### **3.5. Wartość naukowa i oryginalność rozprawy**

W dysertacji Doktorant podjął się rozwiązania problemu przydziału taboru do obsługi miejskiego transportu zbiorowego, który z założenia jest problemem wielowymiarowym o dużej złożoności obliczeniowej. W prowadzonych rozważaniach Doktorant uwzględnia wiele aspektów związanych z tym zagadnieniem, w tym: identyfikację rzeczywistego popytu na usługi przewozowe, szacowanie zużycia energii przez środki transportu, szacowanie wielkości emisji substancji szkodliwych przez transport miejski oraz dostosowanie się do oczekiwań organizatora miejskiego transportu zbiorowego. W celu rozwiązania postawionego problemu przeprowadzono

szczegółowy przegląd literatury problemu, zidentyfikowano zróżnicowane czynniki warunkujące poprawność, opłacalność i ekologiczność przydziału środków do zadań transportu miejskiego, a także przeanalizowano dorobek innych badaczy w obszarze tej problematyki. W rezultacie Doktorant zidentyfikował i zaprezentował rzeczywistą lukę badawczą, którą następnie wypełnił przez opracowanie autorskiego wielokryterialnego modelu przydziału taboru do brygad miejskiego transportu zbiorowego. Model ten został zaimplementowany w postaci aplikacji komputerowej i poddany wielu testom na danych rzeczywistych. **Powiązanie doświadczeń Doktoranta dotyczących pozyskiwania i przetwarzania danych o popycie w sposób ciągły wraz z opracowanym modelem i narzędziem informatycznym służącym do wielokryterialnego przydziału taboru do zadań w mojej ocenie świadczy o wartości naukowej i oryginalności ocenianej dysertacji.**

W odniesieniu do oryginalnego wkładu dysertacji w dyscyplinę naukową inżynieria lądowa i transport możliwe jest zidentyfikowanie w niej trzech aspektów, tj.:

- a) aspektu poznawczego – przeprowadzenie obszernych studiów literaturowych w zakresie modelowania miejskiego transportu zbiorowego i uporządkowanie wiedzy w tym zakresie;
- b) aspektu koncepcyjnego – opracowanie autorskiego podejścia do problemu wielokryterialnego przydziału taboru do obsługi miejskiego transportu zbiorowego z wykorzystaniem rzeczywistych danych zbieranych w sposób ciągły i automatyczny, a także narzędzia informatycznego będącego implementacją komputerową przygotowanego modelu optymalizacyjnego;
- c) aspektu użytecznego – zastosowanie opracowanych modeli optymalizacyjnych i narzędzia informatycznego na potrzeby przydziału taboru do brygad miejskiego transportu zbiorowego oraz badania jego wpływu na zadowolenie (komfort) pasażerów, energochłonność i emisyjność transportu zbiorowego.

---

#### **4. Uwagi szczegółowe**

---

Uważam, że przedłożona do oceny rozprawa została przygotowana na dobrym poziomie. Nie dostrzegam znaczących błędów w przeprowadzonych rozważaniach. Poniższe uwagi mają na celu zwrócenie uwagi Doktoranta na pewne niedoskonałości, nieścisłości lub niedomówienia.

1. We wprowadzeniu lub rozdziale pierwszym dysertacji zabrakło zdefiniowania podstawowych pojęć niezbędnych do poprawnego odbioru i zrozumienia problemu analizowanego w pracy. Głównie mowa w tym przypadku o zaprezentowaniu tego jak Autor rozumie pojęcie trasy, kursu, załogi, itp. Zdefiniowane zostało jedynie pojęcie brygady – przypis dolny str. 29.
2. Na początku pracy przedstawiono „Wykaz wszystkich skrótów i oznaczeń” jednak brakuje w nim wielu skrótów, głównie oznaczeń elementów zbiorów, które w dalszej części pracy wykorzystywane są w formalnych zapisach modeli optymalizacyjnych. Uszeregowanie (np. alfabetyczne) oznaczeń i skrótów znacznie ułatwiłoby ich odnajdywanie w spisie.
3. Doktorant w pracy nie uniknął pewnych nadmiarowych uproszczeń lub skrótów myślowych, np. w rozdziale 1.2.1 na stronie 38 Autor pisze, że ... *„Wykorzystując algorytmy zachłanne w celu wyznaczenia rozwiązania optymalnego nie zawsze możliwe jest jego uzyskanie, jednakże podobnie jak w przypadku algorytmów genetycznych rozwiązanie będzie dobre.”* Określenie „rozwiązanie będzie dobre” na tym poziomie zawansowania prac badawczych jest mocno nieprecyzyjne.
4. W rozdziale 1.4 na stronie 52 dotyczącym energochłonności taboru Autor stwierdza, że: *„Liczby pasażerów w pojeździe nie uwzględniono w dalszej analizie ze względu na dominującą jej rolę w kryterium komfortu podróży.”* Dlaczego zdaniem Autora wykorzystanie liczby pasażerów w kryterium komfortu podróży jest kolidujące w stosunku do wykorzystania zapelnienia pojazdu w celu oszacowania energochłonności pojazdu? Czy liczba podróży nie wpływa znacząco na zużycie paliwa/energii przez pojazd? Czy kryterium komfortu powinno być nadrzędne w stosunku do energochłonności? W związku z powyższymi pytaniami proszę o komentarz Doktoranta.
5. We wzorze 2.1 przedstawionym na stronie 65 i prezentującym funkcję kryterium przydziału taboru wykorzystano oznaczenie  $c_{k,l}$ , które opisano jako *„koszt lub zysk z przejazdu odcinkiem od k do l”*. W przypadku minimalizacji funkcji, jak ma to miejsce w zapisie wzoru 2.1 oznaczenie  $c_{k,l}$  nie powinno mieć dowolności interpretacji. W przypadku traktowania go jako zysku doszłoby do jego minimalizowania, a to byłoby sprzeczne z założeniami problemu przydziału.
6. Na stronie 84 jako jedno z założeń do modelowania przyjęto, że liczba dostępnego taboru jest większa niż liczba zleconych zadań (brygad). Dlaczego Autor odrzuca



sytuację, w której liczba pojazdów będzie równa liczbie zadań? W związku z powyższym proszę o komentarz Doktoranta.

7. W przedstawionych rozważaniach Doktorant proponuje 3 niezależne modele przydziału taboru do brygad, uwzględniające wyłącznie pojazdy spalinowe, wyłącznie pojazdy elektryczne bądź i jedno i drugie. Dlaczego zdaniem Autora takie 3 modele są niezbędne? Dlaczego Doktorant nie zdecydował się na opracowanie tylko jednego modelu z możliwością wyeliminowania z przydziału pojazdów elektrycznych bądź spalinowych (w razie potrzeby) przy pomocy odpowiednio sformułowanych w modelu ograniczeń? W związku z powyższymi pytaniami proszę o komentarz Doktoranta.
8. Przedstawione w rozdziale 3 opisy oznaczeń bardzo często są błędne, np.:
- a. str. 88 – zbiór **B** opisano jako zbiór indeksów dostępnych typów taboru, przedstawiony w formie wektora kolejnych liczb naturalnych od 1 do  $m$ . Zarówno zbiór jak i wektor są różnymi pojęciami i różnie zapisuje się je formalnie, zatem powyższe stwierdzenie, nie jest poprawne.
  - b. str. 90 – zbiór **N** opisano jako zbiór liczby wszystkich brygad miejskiego transportu zbiorowego przedstawiony w formie macierzy wartości liczbowych dla każdego dnia tygodnia i miesiąca roku. Podobnie jak wcześniej jest to błędne sformułowanie, gdyż Dyplomant proponuje przedstawienie zbioru w formie macierzy. Nie definiuje też jej wymiarów.
  - c. str. 92 – zbiór **ZPP** opisano jako zbiór profili podłużnych tras dla brygad, przedstawiony w formie tablicy trójwymiarowej zawierającej informacje dla każdej brygady o promilu pochylenia podłużnego trasy [%] i długości odcinka trasy, na jakim ono występuje [km]. Ponownie Doktorant sugeruje zaprezentowanie zbioru za pomocą macierzy. Dodatkowo nie ma informacji o wielkości każdego z jej wymiarów.
  - d. str. 94 – brak jest konsekwencji w oznaczeniu zbioru prognozowanych danych na temat maksymalnego popytu dla  $a$ -tej brygady.
  - e. str. 97 – brak konsekwencji w zapisie zmiennych decyzyjnych w ograniczeniach (wzór 3.4 - 3.9). Zdefiniowane na str. 96 zmienne decyzyjne  $wps_{a,b}$ ,  $wpe_{a,b}$ ,  $wp_{a,b}$ , w wymienionych powyżej ograniczeniach opisane są jako  $wps_a$ ,  $wpe_a$ ,  $wp_a$ , lub  $wps_b$ ,  $wpe_b$ ,  $wp_b$ .
  - f. str. 99 – brak konsekwencji w zapisie oznaczeń w ograniczeniach (wzór 3.13 - 3.14). Zdefiniowane na str. 91 elementy zbiorów **W** i **DD**, t.j.

$w_{dt,ms,a}$ ,  $dd_{dt,ms,a,b}$ , w wymienionych powyżej ograniczeniach opisane są jako  $w_a$ ,  $dd_{a,b}$ .

Taka niedokładność i nieprecyzyjność w opisie formalnym elementów modelu może utrudnić jego zrozumienie, implementację i weryfikację.

9. W rozdziale 3.5. na str. 97 – 98 wzór 3.4 – 3.6 Autor prezentuje jedno z dwóch głównych ograniczeń dla zagadnienia przydziału taboru. Ma ono zapobiegać sytuacjom, w których po procesie przydziału taboru pozostają brygady, do których nie przydzielono żadnego typu taboru lub przydzielono więcej niż jeden. Jednak jego formalny zapis dla poszczególnych modeli jest niepoprawny. W tym przypadku dla każdej  $a$ -tej brygady należałoby sumować wartości zmiennej decyzyjnej  $wps_{a,b}$  po  $b$ -tych typach taboru, wówczas wzór 3.4 przyjmowałby postać:

$$\bigvee_{a \in A} \sum_{b \in B} wps_{a,b} = 1$$

zamiast

$$\sum_{a \in A} wps_a = 1$$

10. W rozdziale 3.5. na str. 98 wzór 3.7 – 3.9 Autor prezentuje ograniczenie, które zabezpiecza przed sytuacjami, w których do obsługi brygad przydzielono więcej pojazdów jednego typu niż jest eksploatowanych. Jednak jego formalny zapis dla poszczególnych modeli jest niepoprawny. W tym przypadku wartości zmiennej decyzyjnej  $wps_{a,b}$  należałoby sumować zarówno po  $b$ -tych typach taboru, jak i  $a$ -tych brygadach. W ten sposób ograniczenie uwzględnia wszystkie typy taboru przydzielone do wszystkich brygad i sprawdza czy nie przekroczona jest maksymalna liczba pojazdów danego  $b$ -tego typu. Wówczas ograniczenie 3.7 przyjmowałoby postać:

$$\sum_{a \in A} \sum_{b \in B} wps_{a,b} \leq lpts_b$$

zamiast

$$\sum_{b \in B} wps_b \leq lpts_b$$

11. W rozdziale 3.6.1 na stronie 104 zaprezentowano formalny zapis czwartego kryterium cząstkowego uwzględniające oczekiwania organizatora miejskiego transportu zbiorowego. W kryterium wykorzystano funkcję tangens liczoną z iloczynu współczynników oczekiwań przydziału taboru i połowy liczby  $\pi$ . Niestety w treści pracy Autor nie podał żadnych dodatkowych informacji na ten temat. Z czego taki zapis wynika, dlaczego Autor uważa go za poprawny, czy zależność tą zapożyczono z jakiegoś źródła zewnętrznego? W związku z powyższymi pytaniami proszę o komentarz Doktoranta.
12. W rozdziale 4 opisującym implementację komputerową modeli przydziału nie pojawił się żaden zrzut ekranu z przygotowanej aplikacji. Do dokumentacji nie został też dołączony żaden nośnik danych z opracowaną implementacją. Co prawda nie jest to niezbędne do oceny merytorycznej dysertacji, jednak wydaje mi się, że znacząco wzbogaciłoby to pracę.
13. W rozdziale 4.3 Doktorant prezentuje testy modeli optymalizacyjnych przydziału taboru z wykorzystaniem programu komputerowego. W tej części pracy przedstawione są wyniki obliczeń dla różnych danych i wag kryteriów a następnie zestawione z wartościami kryteriów dla rzeczywistych przydziałów taboru do brygad w krakowskim transporcie zbiorowym. Zwyczajowo modele, algorytmy i ich implementacje ocenia się z wykorzystaniem walidacji i weryfikacji. Jak przeprowadzone testy odnoszą się do tych pojęć i związanych z nimi działań? Które z przeprowadzonych działań Doktorant zaliczyłby do walidacji, a które do weryfikacji opracowanych modeli optymalizacyjnych? W związku z powyższymi pytaniami proszę o komentarz Doktoranta.
14. W podsumowaniu dysertacji Autor stwierdza, iż zrealizowano cel praktyczny dysertacji dotyczący: opracowanie efektywnej algorytmicznie metody heurystycznej dla rozwiązywania problemu przydziału taboru do obsługi linii transportu zbiorowego uwzględniającej rzeczywiste uwarunkowania funkcjonowania sieci transportu zbiorowego. W rozprawie nie zdefiniowano pojęcia efektywności algorytmicznej metody, przez to problematyczne może okazać się jednoznaczne ocenienie czy cel ten faktycznie został w pełni osiągnięty. Jakie kryteria opracowana metoda musi spełnić aby można było uznać ją za efektywną algorytmicznie? W związku z powyższym pytaniem proszę o komentarz Doktoranta.

15. Do rozwiązania postawionego w dysertacji problemu badawczego Doktorant zaproponował wykorzystanie algorytmów genetycznych i zachłannych. Dlaczego wybrał akurat te algorytmy? Czy rozważał wykorzystanie innych, np. sieci neuronowych? Jakiego Autor widzi możliwości i ograniczenia zastosowania innych metod do przydziału środków do zadań (np. wspomnianych sieci neuronowych)? W związku z powyższym pytaniem proszę o komentarz Doktoranta.

Praca pod względem edycyjnym jest przygotowana bardzo dobrze. Co prawda pojawiają się w niej drobne błędy i niedoskonałości, jednak nie wpływają one znacząco na odbiór i czytelność dysertacji, a tym samym nie obniżają mojej oceny rozprawy.

---

## **5. Podsumowanie i wniosek końcowy**

---

Rozprawa doktorska pana mgra inż. Jana Hipolita Aleksandrowicza została opracowana na wysokim poziomie merytorycznym. Autor wykazał się bardzo dobrą znajomością problematyki modelowania systemów miejskiego transportu zbiorowego. Na podstawie obszernego przeglądu literatury trafnie zidentyfikował lukę badawczą co pozwoliło na sformułowanie celu naukowego i celu praktycznego rozprawy. Zastosowana metoda rozwiązania sformułowanego zadania badawczego jest poprawna i pozwoliła na opracowanie narzędzia dla decydentów i urbanistów służącego do doboru pojazdów do wykonywania zadań w miejskim transporcie zbiorowym i jego oceny pod kątem zadowolenia i komfortu podróżnych, opłacalności, energochłonności, negatywnego wpływu transportu na środowisko, itp. Cele pracy zostały osiągnięte. Uważam, że praca doktorska Pana Jana Hipolita Aleksandrowicza jest wartościowym dziełem naukowym i stanowi oryginalny wkład w dyscyplinę naukową inżynieria lądowa i transport. Przeprowadzone rozważania świadczą o umiejętności doboru metod i narzędzi służących rozwiązaniu problemu badawczego oraz krytycznej oceny uzyskanych rezultatów. Uważam zatem, że Doktorant wykazał się dojrzałością badawczą oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana praca doktorska mgra inż. Jana Hipolita Aleksandrowicza pt. „Modele optymalizacji przydziału taboru do linii miejskiego transportu zbiorowego”, spełnia warunki przewidziane w Ustawie z dnia 14 marca 2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz

**o stopniach i tytule w zakresie sztuki, (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami) w brzmieniu po wejściu ustawy z dnia 23 czerwca 2016 roku o zmianie ustawy - Prawo o szkolnictwie wyższym oraz niektórych innych ustaw. W związku z powyższym wnoszę o przyjęcie rozprawy przez Radę Naukową Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej i dopuszczenie Pana mgra inż. Jana Hipolita Aleksandrowicza do jej publicznej obrony.**

*M. Krawiec*