

Prof. dr hab. inż. Edward Michłowicz  
Akademia Górniczo – Hutnicza  
im. Stanisława Staszica w Krakowie  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki  
e-mail: michlowi@agh.edu.pl

Kraków, 30.04.2022



## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Witolda BARTNIKA

na temat:

### **Organizacja systemu publicznego transportu miejskiego z uwzględnieniem multimodalnych węzłów przesiadkowych**

Podstawą wykonania recenzji jest Uchwała nr 341/2022 Rady Naukowej Dyscypliny „Inżynieria Lądowa i Transport” Politechniki Warszawskiej z dnia 1.03.2022 r. oraz pismo dr hab. inż. Konrada Lewczuka, prof. uczelni – Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny „Inżynieria Lądowa i Transport” Politechniki Warszawskiej z dnia 16.03.2022 r. (WTBD.521.DR.55.2022).

Dokumentację merytoryczną do sporządzenia recenzji stanowił egzemplarz rozprawy doktorskiej mgra inż. Witolda Bartnika pt. *Organizacja systemu publicznego transportu miejskiego z uwzględnieniem multimodalnych węzłów przesiadkowych*.

Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Marianna Jacyna, a promotorem pomocniczym – dr hab. inż. Mariusz Izdebski, prof. uczelni.

#### **1. Ogólna charakterystyka rozprawy**

Rozprawa doktorska mgra inż. Witolda Bartnika zawarta jest na 203 stronach, a jej treść wypełnia jedenastce numerowanych rozdziałów oraz trzy załączniki. Pracę otwierają streszczenia (w języku polskim oraz języku angielskim), spis treści, wykaz ważniejszych pojęć używanych w pracy oraz wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń. Rozprawę można podzielić na trzy zasadnicze części:

- część pierwszą (rozdziały od 1 do 3, ok. 40 stron), która zawiera treści związane z identyfikacją problemu badawczego, sformułowanie celu i tezy rozprawy oraz obszerny i wartościowy przegląd literatury dotyczący problematyki metod i narzędzi wykorzystywanych w organizacji publicznego transportu miejskiego,

- część drugą (rozdziały 4, 5 i 6, ok. 65 stron), która obejmuje najważniejsze osiągnięcia Doktoranta, tj. sformułowanie modelu decyzyjnego organizacji sieci publicznego transportu miejskiego z uwzględnieniem multimodalnych węzłów przesiadkowych, opis zaproponowanej metody organizacji sieci oraz implementację komputerową (autorska aplikacja GS – Genetic Solver),

- część trzecią (rozdziały 7 i 8 oraz załączniki 1 – 3, ok. 60 stron) stanowi weryfikacja zaproponowanej metody na przykładzie Warszawy oraz obszerne wyniki badań, a także wnioski z przeprowadzonych prac badawczych.

Nie wnikając w szczegółową ocenę merytoryczną rozprawy stwierdzam, że praca została poprawnie i starannie napisana zarówno pod względem językowym, jak i edytorskim. Rozprawa porusza aktualny i złożony problem dotyczący transportu publicznego w większości dużych aglomeracji miejskich. Ponadto na uwagę zasługuje bardzo obszerny wykaz literatury (ponad 220 pozycji), z czego znaczącą część stanowią publikacje wydane w ostatnich kilku latach w czasopiśmie naukowych.

## 2. Ocena merytoryczna rozprawy

Dynamiczny rozwój dużych aglomeracji miejskich wymaga rozwiązywania wielu problemów. Jednym z ważniejszych jest od wielu lat problem powiększającego się popytu na przemieszczanie dóbr i ludzi w obrębie tych aglomeracji. Nie ulega wątpliwości, że w rozwiązywaniu tych problemów konieczne jest wykorzystanie możliwości współczesnej nauki. Dotyczy to zwłaszcza poszukiwania optymalnych rozwiązań w metodach ilościowych wspomagających procesy podejmowania decyzji w tych obszarach, które decydują o jakości obsługi szeroko rozumianego klienta.

Doktorant rozważa w pracy bardzo istotne i trudne z naukowego punktu widzenia problemy związane z optymalizacją organizacji publicznego transportu miejskiego. Do znanego problemu proponuje dołączyć uwzględnienie w sieci transportowej multimodalnych węzłów przesiadkowych. W związku z dużą złożonością obliczeniową zagadnienia te zaliczane są do klasy problemów NP-trudnych, a to z konieczności prowadzi do stosowania heurystycznych lub metaheurystycznych metod rozwiązywania problemu.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest w mojej ocenie bardzo dobrze opracowana od strony metodologicznej.

Po przeglądzie literaturowym zagadnień związanych z identyfikacją obszaru badań Doktorant sformułował cel i tezę rozprawy. Następnie przeprowadził obszerną analizę literaturową problemów związanych z zadaniami multimodalnych węzłów przesiadkowych w sieciach miejskich oraz analizę metod stosowanych w organizacji publicznego transportu miejskiego.

Przeprowadzone analizy umożliwiły Doktorantowi opracowanie autorskiego modelu decyzyjnego organizacji badanej sieci transportowej. W kolejnym kroku realizacji celu zaproponował metodę umożliwiającą optymalizację organizacji sieci (minimalizacja czasu podróży). W celu uzyskania możliwości rozwiązywania problemów organizacji sieci z multimodalnymi węzłami przesiadkowymi Doktorant opracował autorską aplikację komputerową Genetic Solver – GS (w C#).

Procedurę poszukiwania rozwiązania problemu (optymalnego) zamyka weryfikacja zaproponowanej metody na przykładzie organizacji publicznego systemu transportu zbiorowego w mieście stołecznym Warszawa.

Rozprawę kończy podsumowanie zawierające poprawnie sformułowane wnioski oraz propozycje kierunków dalszych badań.

Stwierdzam, że praca przygotowana przez mgra inż. Witolda Bartnika to metodologicznie dobra i wartościowa rozprawa.

### Temat, teza i cel pracy

Wybór tematyki pracy uważam za celowy, uzasadniony, a uwzględniając fakt, że część aplikacyjna dotyczy aglomeracji warszawskiej – wybór jest nadzwyczaj aktualny. Tytuł pracy: *Organizacja systemu publicznego transportu miejskiego z uwzględnieniem multimodalnych węzłów przesiadkowych* w sposób wyraźny określa badany problem. Jednak w moim odczuciu, w szczególności po analizie pracy, byłoby lepiej gdyby Autor doprecyzował *organizację systemu*, np. poprzez dodanie choćby jednego słowa:

- *Modelowanie organizacji...*(budowa modelu oraz badania na modelu), czy też
- *Metoda organizacji systemu...*(bo jest w celu rozprawy).

Mgr inż. Witold Bartnik w swojej rozprawie (str. 19) stwierdza, że: „Stosunkowo niewiele prac porusza natomiast kwestie związane z funkcjonowaniem multimodalnego

węzła przesiadkowego w sieci transportowej, a szczególnie w zakresie projektowania systemów publicznego transportu zbiorowego...".

Na tej podstawie Doktorant sformułował tezę dysertacji (str. 20):

***Algorytmy heurystyczne umożliwiają rozwiązywanie złożonych problemów decyzyjnych w zakresie organizacji publicznego transportu miejskiego z uwzględnieniem multimodalnych węzłów przesiadkowych.***

Na tej samej stronie, poniżej tezy, Doktorant zdefiniował cel rozprawy, stwierdzając, że celem jest: ***opracowanie metody organizacji publicznego transportu miejskiego w aglomeracjach silnie zurbanizowanych z uwzględnieniem multimodalnych węzłów przesiadkowych jako narzędzia do wspomagania decyzji w zakresie zarządzania systemem miejskiego transportu zbiorowego.***

Przez wiele lat wymagano od Doktorantów sformułowania tezy rozprawy. Moim zdaniem stawianie tezy nadal ma sens, ale wyłącznie w przypadkach nietrywialnych. Taki nietrywialny, bardzo złożony, NP - trudny do rozwiązania problem podjął w swojej rozprawie mgr inż. Witold Bartnik. Zatem postawienie tezy o możliwości rozwiązania problemu poprzez wykorzystanie algorytmu heurystycznego jest jak najbardziej celowe.

Stwierdzam, że zarówno teza, jak i cel pracy są poprawnie sformułowane.

#### **Ocena przeprowadzonych badań i analiz, uwagi i wątpliwości**

To co najważniejsze w pracy i decyduje o naukowej wartości rozprawy zostało zawarte w dwóch rozdziałach:

- rozdział 4: *Model decyzyjny organizacji sieci publicznego transportu miejskiego z uwzględnieniem multimodalnych węzłów przesiadkowych,*
- rozdział 5: *Procedura i algorytm metody organizacji publicznego transportu miejskiego z uwzględnieniem multimodalnych węzłów przesiadkowych.*

Dodatkową wartością pracy jest autorska implementacja komputerowa zaproponowanej przez Doktoranta metody organizacji publicznego transportu poprzez aplikację GS – Genetic Solver (w języku C#; rozdz. 6). Aplikacja umożliwiła Doktorantowi przeprowadzenie obszernych badań weryfikujących poprawność metody na przykładzie publicznego systemu zbiorowego miasta stołecznego Warszawa (rozdz. 7). Szczegółowe opisy związane z badaniami symulacyjnymi zostały zawarte w załącznikach (Załącznik 1, 2 oraz 3). Percepcja opisów jest zawsze mniejsza, niż wizualizacja wyników. Stąd przedstawienie wyników w postaci grafów multimodalnej sieci transportowej wraz z umieszczeniem w tej sieci multimodalnych węzłów przesiadkowych jest cenną wartością pracy.

#### **Uwagi do *Modelu organizacji multimodalnego publicznego transportu zbiorowego – MOMPTZ* (rozdz. 4)**

Moim zdaniem sformułowanie bardzo złożonego modelu organizacji publicznego transportu miejskiego z uwzględnieniem multimodalnych węzłów przesiadkowych MOMPTZ jest najważniejszym osiągnięciem naukowym Doktoranta.

Wg Doktoranta model MOMPTZ opisuje uporządkowana piątka:

$$\text{MOMPTZ} = \langle G, LK, FP, ZP, O \rangle.$$

Model tak złożonego systemu wymaga uwzględnienia wielu obiektów (elementów), a także relacji między nimi oraz otoczeniem.

Elementami modelu są:

G – struktura sieci transportowej,

LK – zbiór linii transportowych,  
FP – zbiór charakterystyk elementów sieci,  
ZP – zapotrzebowanie na przewóz,  
O – organizacja realizacji zadań przewozowych.

Poszczególne elementy modelu, a także relacje (od R1 do R9) są szczegółowo opisane w pracy. **Nie znalazłem w pracy opisu obiektu „O” – proszę o wyjaśnienie.**

Dla lepszej przejrzystości skomplikowanych zależności używanych w opisach elementów modelu warto było przedstawić graficznie procedurę budowy modelu. Nawet prosty schemat blokowy jest bardzo pomocny przy tak złożonych zapisach, które zastosował Doktorant. Zresztą w swej rozprawie na str. 21 (schemat organizacji rozprawy) Doktorant umieścił prosty blok *Opracowanie modelu organizacji systemu publicznego transportu zbiorowego*. Zamieszczenie podobnego schematu, rozbudowanego o oznaczenia literowe używane w modelu – zdecydowanie ułatwiłoby śledzenie zależności wyprowadzonych przez Doktoranta.

Po opisie zmiennych decyzyjnych i ograniczeń Autor sformułował funkcję kryterium F (Y, Z), która minimalizuje całkowity czas jazdy (*lepiej – przemieszczania*) wszystkich pasażerów wykonujących podróże w zadanych relacjach przewozowych (dziewięć relacji w modelu).

W modelu MOMPTZ Doktorant przyjął dwanaście zmiennych decyzyjnych (X1-X8, Y, Z, K, F) – **dlaczego zatem funkcja kryterium zależy tylko od zmiennych Y oraz Z ?**

Ogólnie – model matematyczny opisany na stronach od 57 do 81 świadczy o dużej wiedzy Doktoranta w zakresie modelowania złożonych procesów, a także umiejętności formułowania i budowy złożonych zmiennych, ograniczeń i kryteriów.

#### **Uwagi do Procedury i algorytmu metody organizacji publicznego transportu...(rozdz. 5)**

Zaprezentowana w rozdziale 5 metoda organizacji publicznego transportu miejskiego z uwzględnieniem multimodalnych węzłów przesiadkowych składa się z sześciu kroków (etapów):

Krok 1 – pozyskiwanie danych.

Krok 2 - wczytywanie danych.

Krok 3 – generowanie tras początkowych linii komunikacyjnych.

Krok 4 – optymalizacja tras linii komunikacyjnych.

Krok 5 – wyznaczenie częstotliwości linii komunikacyjnych.

Krok 6 – analiza uzyskanych rozwiązań.

Na stronie 83 Doktorant słusznie stwierdza, że *...kluczowe znaczenie w implementacji opracowanej metody ma proces wprowadzania danych wejściowych* (Krok 1 i Krok 2). Do generowania tras początkowych (Krok 3) Autor wykorzystuje algorytm Floyda-Warshalla. Natomiast do właściwego wyznaczania tras linii komunikacyjnych (Krok 4) Doktorant zaproponował wykorzystanie algorytmu genetycznego swojego autorstwa. Szczegółowe opisy zaproponowanego algorytmu (str. 85 – 109) świadczą o bardzo dużych zasobach umiejętności Doktoranta w zakresie wykorzystania możliwości algorytmów genetycznych do rozwiązywania złożonego problemu przedstawionego w modelu systemu MOMPTZ.

Całość rozdziału 5 oceniam bardzo pozytywnie, ale mam kilka wątpliwości.

W kilku miejscach opisu algorytmu Autor stwierdza, że... ***kolejne rozwiązania będą ulepszone w dalszych iteracjach algorytmu genetycznego.*** Standardowo zakłada się, że algorytm genetyczny dąży do uzyskania oczekiwanego rozwiązania poprzez

wybieranie najlepszych cech rozwiązań z określonego zbioru (operacje krzyżowania, mutacji i selekcji). Skąd zatem przeświadczenie Doktoranta, że rozwiązanie uzyskane w Kroku 4 jest optymalne? Na schemacie 5.1. Krok 4 – to optymalizacja tras linii komunikacyjnych, a na stronie 102 (5.4.3. *Operatory algorytmu genetycznego*) Autor stwierdza, że *kryterium optymalizacyjnym jest minimalizacja całkowitego czasu podróży pasażerów z uwzględnieniem kary za nieobsłużone relacje*. Także na schemacie 5.10. widnieje blok *Zapis rozwiązania optymalnego*. Czy spełnienie warunku zawartego w blok logicznym (Rys. 5.10) *Warunek zatrzymania osiągnięty?* upoważnia do stwierdzenia, że **rozwiązanie jest optymalne?**

Druga wątpliwość dotyczy ustalania *częstotliwości dla linii komunikacyjnych*.

Ze schematu 5.10 wynika, że dla uzyskanego rozwiązania (optymalnego?) ustalana jest częstotliwość linii. Czy zmiana częstotliwości linii zmieni rozwiązanie (wydaje się to oczywiste). Czy podążając myślowo za schematem należy rozumieć, że uzyskane najlepsze rozwiązanie jest uzyskane dla ustalonej częstotliwości linii?

Jeszcze jedna uwaga, bez większego znaczenia – podpis pod rysunkiem 5.1. – *Schemat procedury metody...* – w moim odczuciu wystarczy używać słowa *metoda* (czy może być *procedura metody?*).

#### **Uwagi do Implementacji komputerowej algorytmu (rozdz. 6)**

Przedstawiona w rozdziale 6 aplikacja komputerowa GS – Genetic Solver jest dużym osiągnięciem Autora. Aplikacja została napisana w języku C# (ewolucja C i C++). Jej zadaniem jest wsparcie procesów projektowania multimodalnych systemów publicznego transportu zbiorowego w aglomeracjach miejskich. Doktorant stwierdza ponadto, że celem aplikacji GS było także wykazanie skuteczności proponowanych w dysertacji rozwiązań. Funkcjonalności aplikacji pozwalają – wg Autora – na optymalizację układu linii komunikacyjnych zarówno dla rzeczywistych systemów transportowych, jak i dla systemów sztucznych. Na stronie 110 Doktorant pisze, że *...aby przygotować aplikację do optymalizacji wybranego, rzeczywistego multimodalnego systemu publicznego transportu miejskiego, wykonywany jest załadunek danych w formacie GTFS*. Ponadto konieczne może być także *...wgranie dodatkowych plików zawierających dane dotyczące multimodalnych węzłów przesiadkowych i zapotrzebowanie na podróż (więźby ruchu)*.

Dla złożonych systemów transportowych konieczna jest zatem bardzo duża liczba danych. W moim odczuciu może to powodować problem w uzyskaniu zadawalającego rozwiązania (niekoniecznie optymalnego). Powstają pytania:

- skąd pozyskać dane,
  - jak sprawdzić wiarygodność danych (jakie dane, takie wynik?),
  - co w przypadku braku danych dla pewnej zbiorowości (np. czas przejazdu od – do),
  - które dane są kluczowe (zapotrzebowanie na przewóz, linie komunikacyjne, inne?).
- Ponadto wydaje się, że bardzo istotnym elementem aplikacji jest początkowy zbiór linii komunikacyjnych. W rozprawie Doktorant opisuje trzy możliwe sposoby generowania tego zbioru. Czy zdaniem Autora można wskazać jakieś preferencje przy wyborze, czy też metoda wyboru nie wpływa na wyniki końcowe.

#### **Uwagi do Weryfikacji metody organizacji publicznego systemu ...(rozdz. 7)**

Zwieńczeniem rozprawy jest weryfikacja opracowanej przez Doktoranta metody organizacji systemu publicznego transportu miejskiego. Wyniki obliczeń przeprowadzonych dla miasta stołecznego Warszawa zostały przedstawione

w rozdziale siódmym oraz w trzech załącznikach. Dla operatorów zarządzających systemem bardzo wartościowymi są zapewne grafy linii tramwajowych i autobusowych uzyskane po optymalizacji algorytmem genetycznym. Ocena jakości uzyskanych rozwiązań nie jest oczywiście celem rozprawy. Natomiast w nawiązaniu do modelu systemu, a właściwie do funkcji kryterium – powstaje pytanie, czy możliwe jest porównanie wyników uzyskiwanych w systemie rzeczywistym i w systemie zbudowanym przez Doktoranta. Wydaje się, że operatorzy systemów transportu publicznego rzadko optymalizują czas podróży pasażerów. Jak zatem zinterpretować wyniki zawarte w tabelach 7.1. i 7.2. (w odniesieniu do funkcji kryterium F).

**Podczas publicznej obrony proszę o bliższą interpretację problemu uzyskiwanej zbieżności algorytmu.**

Czy uwzględnienie multimodalnych węzłów przesiadkowych znacząco wpłynęło na rozwiązanie problemu ?

Czy w ogóle jest możliwe ocenienie tego wpływu (skoro węzły są zadane w strukturze)?

### **Uwagi końcowe i pytania dodatkowe**

**Sformułowany przez Doktoranta model matematyczny odwzorowujący działanie multimodalnego systemu publicznego transportu miejskiego oceniam wysoko.**

### **Dodatkowe pytania i uwagi szczegółowe (wybrane)**

1. Cel rozprawy: metoda czy optymalizacja, czego ?

Na stronie 20 – Doktorant stwierdza, że celem rozprawy jest **opracowanie metody organizacji publicznego transportu w aglomeracjach silnie zurbanizowanych...**

Natomiast na stronie 21 (w opisie zagadnień do realizacji) Autor pisze, że jednym z zagadnień do realizacji jest **opracowanie algorytmu heurystycznego rozwiązującego problem decyzyjny optymalnego doboru linii komunikacyjnych i ich częstotliwości do potrzeb przewozowych...**

Na stronie 97 Doktorant stwierdza (5.4.1. Założenia...):

*Do rozwiązania głównego problemu analizowanego w niniejszej rozprawie, czyli **optymalizacji zadanego zbioru tras linii komunikacyjnych**, zdecydowano się wykorzystać algorytm genetyczny.*

2. Problem nazewnictwa badanego systemu

Może niepotrzebnie Autor w wielu miejscach pracy używa różnych nazw tego samego systemu. Są to często synonimy, ale skoro w tytule rozprawy występuje *organizacja systemu publicznego transportu miejskiego z uwzględnieniem multimodalnych węzłów przesiadkowych*, to warto było być konsekwentnym w używaniu tej nazwy. Tymczasem Doktorant kilkakrotnie zmienia tę nazwę:

- model organizacji multimodalnego publicznego transportu zbiorowego (str. 59),
- multimodalny system publicznego transportu miejskiego (str. 110),
- weryfikacja metody organizacji publicznego systemu zbiorowego (str. 123).

3. Za dużo w pracy różnych „optymalizacji”, np.

- optymalna lokalizacja węzła lub węzłów przesiadkowych (str.19),
- optymalny dobór linii komunikacyjnych i ich częstotliwości (str. 21),
- optymalizacja organizacji systemów... (str. 22),
- optymalne projektowanie sieci transportu miejskiego (str. 77),
- optymalizacja zadanego zbioru tras początkowych linii komunikacyjnych (str. 83),
- zapis uzyskanego w wyniku optymalizacji rozwiązania – najlepszego osobnika z populacji (str. 103).

Mamy: optymalną lokalizację, optymalny dobór linii, optymalną organizację, optymalne projektowanie - niekoniecznie wszystkie rozwiązania muszą być optymalne (z rozważanych wariantów wybieramy najlepsze).

Czy algorytmy genetyczne, badania symulacyjne umożliwiają uzyskanie rozwiązań optymalnych ?

### 3. Podsumowanie i ocena końcowa

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Witolda Bartnika pt. *Organizacja systemu publicznego transportu miejskiego z uwzględnieniem multimodalnych węzłów przesiadkowych* podejmuje bardzo aktualne oraz istotne problemy poznawcze o znacznym potencjale aplikacyjnym.

Poziom naukowy i aplikacyjny, a także całość przedstawionej rozprawy oceniam wysoko:

- Doktorant bardzo zasadnie opisuje wybór tematu, formułuje tezę, podaje cele,
- dokonuje bardzo obszernego przeglądu aktualnej literatury (zarówno polskich, jak i zagranicznych autorów),
- w sposób naukowy buduje model złożonego obiektu badań,
- opracowuje oryginalną, autorską metodę doboru organizacji multimodalnego systemu publicznego transportu miejskiego,
- tworzy algorytm genetyczny umożliwiający rozwiązanie problemu badawczego,
- dokonuje implementacji komputerowej autorskiego algorytmu (aplikacja GS),
- przeprowadza weryfikację metody oraz dokonuje właściwej oceny uzyskanych rozwiązań.

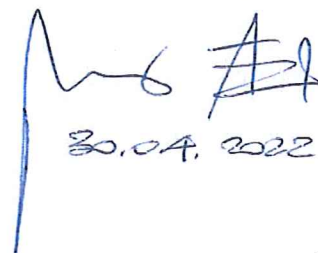
Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta zaliczam:

- opracowanie modelu matematycznego organizacji sieci publicznego transportu miejskiego z uwzględnieniem multimodalnych węzłów przesiadkowych,
- sformułowanie autorskiej metody organizacji miejskiego publicznego transportu multimodalnego,
- opracowanie algorytmu genetycznego umożliwiającego rozwiązanie złożonego problemu wyboru tras linii komunikacyjnych,
- implementację autorskiego algorytmu poprzez aplikację cyfrową GS.

Ważnym elementem przedstawionej rozprawy jest także wskazanie przez Doktoranta kierunków dalszych badań (str. 148). Szczególnie istotną propozycją jest dodanie do zaproponowanego modelu transportu publicznego udziału indywidualnej komunikacji samochodowej i rowerowej.

Na podstawie sporządzonej recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Witolda Bartnika pt. *Organizacja systemu publicznego transportu miejskiego z uwzględnieniem multimodalnych węzłów przesiadkowych* stwierdzam, że spełnione zostały wymagania określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r. poz. 85) oraz w Dziale 5 – Stopnie i tytuł w systemie szkolnictwa wyższego i nauki (art. 186, ust. 1).

**Tym samym wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Witolda Bartnika do publicznej obrony i do ubiegania się o stopień doktora w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport.**



30.04.2022