

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

Koszalin, 20.09.2021 r.

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

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Radosława Grymina

pt. „**Metody rozwiązywania dyskretno-ciągłych problemów marszrutyzacji**”

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

Tematyka rozprawy dotyczy wybranej klasy problemów marszrutyzacji (w szczególności problemu komiwojażera (TSP)), w których uwzględnia się zarówno dyskretne zmienne decyzyjne (np. marszruty), jak i ciągłe (np. współrzędne określające lokalizację odwiedzanych punktów). Przykładem problemu tej klasy jest omawiany w pracy Problem Komiwojażera z Sąsiedztwami (TSPN) (rozważane 2 warianty: Problem Dostatecznie Bliskiego Komiwojażera z Wyróżnionym Punktem Startowym (CETSP-SP), Cykliczny Problem Dostatecznie Bliskiego Komiwojażera (CCETSP)). Rozważany problem należy do grupy problemów optymalizacji dyskretno-ciągłej obejmującej szerokie spektrum zastosowań w zakresie planowania transportu: dystrybucja towarów (np. paczek) przez bezzałogowe statki powietrzne (UAVs), planowanie misji ratunkowych UAVs, kontrola i monitoring (systemy alarmowe, inspekcja obiektów leśnych, wykrywanie zagrożeń powodziowych, wykrywanie wykroczeń i nieprzestrzeganie przepisów drogowych), itp. Tematyka związana z rozwiązywaniem Problemu Komiwojażera jest znana od wielu lat, ale wciąż jest bardzo aktualna, a liczba spotykanych w praktyce problemów przerasta liczbę opracowanych do tej pory metod i modeli – przykładem kolejnego nowego wariantu problemu TSP jest sformułowany przez Doktoranta Problem Cyklicznego Dostatecznie Bliskiego Komiwojażera (CCETSP). Potwierdzeniem wciąż niesłabnącego zainteresowania tą tematyką jest również liczba publikacji, która w ostatniej dekadzie wynosi ponad 6000 (dane wg bazy Scopus z dnia 20.09.2021).

Jak powszechnie wiadomo TSP należy do klasy problemów NP-trudnych. Oznacza to, że nie należy się spodziewać czasowo efektywnych algorytmów jego rozwiązywania. Z tego powodu wykorzystanie metod dokładnych (gwarantujących wyznaczenie rozwiązań optymalnych – np. zaproponowany przez doktoranta algorytm przeglądu zupełnego BFA) ogranicza się wyłącznie do problemów małej skali. W pozostałych przypadkach problemów (o skali spotykanej w praktyce) stosowane są głównie metody przybliżone (heurystyczne). W szczególnych jednak

WPLYNĘŁO

24.09.2021

RDN-AEE/162/2021

sytuacjach (ograniczających się do wąskich klas problemów) możliwa jest konstrukcja efektywnych czasowo algorytmów, których skuteczność warunkowana jest właściwościami wynikającymi z natury rozważanego wariantu problemu. Inaczej mówiąc, poszukiwane są rozwiązania pozwalające na zwiększenie efektywności przeszukiwania przestrzeni rozwiązań dopuszczalnych, poprzez pełniejsze wykorzystywanie tak własności ogólnych problemu, jak i szczególnych własności aktualnie rozwiązywanych instancji. Możliwość budowy tego typu algorytmów dla wybranej klasy problemów TSP stanowi motywację prowadzonych przez Doktoranta badań.

W tym ujęciu opiniowana rozprawa koncentruje się na zagadnieniach modelowania i rozwiązywania szczególnych wariantów (dyskretno-ciągłych) problemu TSP:

- Problemu Dostatecznie Bliskiego Komiwojażera z Wyróżnionym Punktem Startowym (CETSP-SP),
- Cyklicznego Problemu Dostatecznie Bliskiego Komiwojażera (CCETSP).

W rozważanych problemach zakłada się, że sąsiedztwa odwiedzanych przez komiwojażera wierzchołków są kołami, w związku z tym położenie punktów optymalnej ścieżki znajduje się na ich obwodzie. Przyjęte założenia pozwalają zredukować rozmiar rozważanych problemów dzięki czemu możliwe jest zbudowanie czasowo-efektywnych algorytmów ich rozwiązywania. W tym ujęciu koncepcję rozważanego problemu można zrekonstruować w następujący sposób: dany jest zbiór klientów (wierzchołków rozmieszczonych na płaszczyźnie), dla których zdefiniowano regiony (sąsiedztwa wierzchołków) odwiedzane przez komiwojażera (lub m-komiwojazerów). Poszukiwana jest ścieżka komiwojażera (lub ścieżki m-komiwojazerów) o najkrótszej długości, która przechodzi przez co najmniej jeden punkt z sąsiedztwa każdego klienta. Dla tak zdefiniowanego problemu prowadzone są poszukiwania modelu, którego właściwości umożliwiają budowę efektywnej metody przeszukiwania przestrzeni rozwiązań dopuszczalnych.

Uważam, że opiniowana rozprawa podejmuje ważny i aktualny problem. Elementy nowości przejawiają się tak w oryginalnym sformułowaniu Cyklicznego Problemu Dostatecznie Bliskiego Komiwojażera, jak i autorskich algorytmach (Algorytm Przeglądu Zupełnego BFA, Kaskadowy Algorytm Heurystyczny KAH, Algorytm Tabu Search TS) implementujących wykazane w rozprawie właściwości. Podjęcie przedstawionej problematyki jest uzasadnione zarówno ze względów poznawczych, jak i możliwości wielu praktycznych zastosowań związanych m.in. z systemami transportu powietrznego UAV.

## 2. Kompozycja i treść rozprawy

Opiniowana rozprawa liczy 153 strony i składa się z 9 rozdziałów, wykazu cytowanej literatury liczącego 226 pozycje, 1 dodatku oraz spisów stosowanych symboli, tablic, rysunków. Załączona lista źródeł bibliograficznych obejmuje ważniejsze pozycje literaturowe z zakresu przedmiotu pracy. Warto podkreślić, że w bibliografii występuje 6 współautorskich publikacji Doktoranta. Jedna z nich została opublikowana w czasopiśmie *Archives of Control Sciences* (IF = 1.697) indeksowanym w Journal Citation Reports.

W rozprawie wyodrębnić można trzy zasadnicze części. W części pierwszej (obejmującej rozdziały 1-3) sformułowano tezy rozprawy oraz przedstawiono podstawowe pojęcia oraz stan wiedzy z zakresu problemów marszrutyzacji (wybrane problemy komiwojażera) i metod optymalizacji dyskretnej i ciągłej. W szczególności przedstawiono sformułowanie problemów Komiwojażera z Sąsiedztwami TSPN oraz Komiwojażera Dubinsa. Z zakresie metod optymalizacji scharakteryzowano 2 metody optymalizacji ciągłej (Metoda Powella, Sekwencyjne Programowanie Kwadratowe) i 6 metod optymalizacji dyskretnej (Metoda Podziału i Ograniczeń, Programowanie Dynamiczne, Algorytm 2-Opt, itp.). Przyjęta formuła prezentacji jest w większości przypadków klarowna, choć miejscami nie jest jasne w jakim celu autor przedstawia takie a nie inne treści. Przykładem może być tu opis Problemu Komiwojażera Dubinsa (7 stron rozprawy – podrozdział 2.2), z którego w dalszej części rozprawy w ogóle Doktorant nie korzysta.

Tezy rozprawy zostały sformułowane poprawnie, choć pewien niedosyt odczuwalny jest w zakresie uzasadnienia motywacji prowadzonych badań. Poza krótką dyskusją zawartą we „Wprowadzeniu” oraz podrozdziale 4.1 (str. 55) brakuje szerszego uzasadnienia, z jakiego powodu Doktorant zdecydował się na takie, a nie inne badania. Szczególnie ważne w tym kontekście wydaje się przedstawienie pogłębionej dyskusji na temat luki badawczej, której uzupełnienie jest istotne zarówno dla teorii, jak i praktyki (np. wsparcia procesu decyzyjnego w zakresie planowania dostaw z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych).

W części drugiej (rozdziały 4-7) zawierającej główne (poznawcze) wyniki rozprawy, przedstawiono autorskie sformułowanie problemów komiwojażera: CETSP-SP, CCETSP oraz zaproponowano szereg własności (6 twierdzeń) umożliwiających redukcję rozmiaru tych problemów. Na podstawie opracowanych własności zaproponowano dwie strategie do rozwiązywania problemów dyskretno-ciągłych: DFCS (Discrete First Continuous Second), CFDS (Continuous First Discrete Second). Wymienionym strategiom poświęcono rozdziały 5 i 6, w których zaprezentowano i porównano ze sobą:

- Algorytm Przeglądu Zupełnego, Algorytm Przeglądu Zupełnego BFA, algorytm 2-Opt, Kaskadowy Algorytm Heurystyczny KAH dla strategii DFCS,
- Algorytm Przeszukiwania z Zabronieniami (Tabu Search, TS) dla strategii CFDS.

Szczególnie dużo uwagi Doktorant poświęcił badaniu algorytmów rozwiązywania autor-  
skiego sformułowania Cyklicznego Problemu Dostatecznie Bliskiego Komiwojażera (rozdział  
7). W ramach prowadzonych badań wyselekcjonował dwa algorytmy rekomendowane do roz-  
wiązywania tego typu problemów: algorytmu Tabu Search oraz algorytm KAH.

Należy podkreślić, że przyjęty sposób narracji tej części rozprawy świadczy o bardzo  
dobrym przygotowaniu i wysokich kompetencjach Doktoranta. Rzetelność Doktoranta w pro-  
wadzeniu badań potwierdza w szczególności sposób przeprowadzenia dowodów poszczegól-  
nych własności (w sumie w rozprawie wykazanych zostało 6 twierdzeń).

Wśród niedostatków tej części rozprawy w pierwszej kolejności należy zaliczyć brak ana-  
lizy złożoności obliczeniowej proponowanych algorytmów oraz redukcji rozmiaru rozważa-  
nych problemów uzyskanej w skutek stosowania wyprowadzonych w rozprawie własności tzn.:  
oceny o ile zmniejsza się przestrzeń przeszukiwania dzięki wykorzystaniu uproszczeń wynika-  
jących z Twierdzeń przedstawionych w rozdziale 4.3.

Szkoda również, że Doktorant nie przeprowadził eksperymentów dla instancji proble-  
mów o rozmiarach większych niż  $n=29$ . Prezentowane wyniki pokazują, że byłoby to możliwe.  
Eksperymenty tego typu pozwoliłyby na ocenę skali problemów, dla których proponowane  
algorytmy pozwalają uzyskać odpowiedź w sensownym czasie .

Pewnym niedostatkiem tej części rozprawy jest również brak przeprowadzenia ekspery-  
mentów porównawczych z już istniejącymi podejściami. Doktorant odnosi się co prawda do  
badań literaturowych w zakresie algorytmów MIP, jednak to porównanie wymagało przeska-  
lowania dostępnych wyników. W mojej opinii bardziej wartościowe (i łatwiejsze w realizacji)  
byłoby przeprowadzenie eksperymentów porównawczych implementujących rozważane pro-  
blemy w takich środowiskach jak: IBM CPLEX, GUROBI, itp.

W części trzeciej (rozdział 8) przedstawiono opis oraz wyniki przeprowadzonych ekspe-  
rymentów dla problemu m-DTSPN sformułowanego i rozwiązanego w trakcie szkoły letniej  
dot. systemów złożonych, organizowanej przez Politechnikę Czeską w Pradze we współpracy  
z IEEE RAS w 2019 roku. Szkoda, że przeprowadzone eksperymenty ograniczyły się tylko do  
wykorzystania algorytmu zaproponowanego przez Vana i Faigl [205]. W rozdziale zabrakło  
wyników pokazujących, jak skuteczne są analizowane w poprzednich rozdziałach algorytmy  
(np. algorytmu Tabu Search oraz algorytm KAH).

Pomimo wskazanych niedostatków należy podkreślić, że przyjęty sposób narracji tej części rozprawy jest na ogół poprawny i świadczy o dobrym przygotowaniu oraz wysokich kompetencjach Doktoranta.

### **3. Oryginalne osiągnięcia**

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

1. Wprowadzenie nowego problemu Cyklicznego Dostatecznie Bliskiego Komiwożajera (CCETSP).
2. Wykazanie szeregu twierdzeń umożliwiających opracowanie czasowo efektywnych algorytmów optymalizacji dyskretno-ciągłej dla problemów Dostatecznie Bliskiego Komiwożajera z wyróżnionym punktem startowym (CETSP-SP) oraz Cyklicznego Problemu Dostatecznie Bliskiego Komiwożajera (CCETSP).
3. Zaproponowanie dwóch strategii do rozwiązywania problemów dyskretno-ciągłych: DFCS (Discrete First Continuous Second), CFDS (Continuous First Discrete Second).
4. Zaproponowanie i przeanalizowanie szeregu algorytmów optymalizacyjnych: Algorytm Przeglądu Zupełnego BFA, algorytm 2-Opt, Kaskadowy Algorytm Heurystyczny KAH, Tabu Search TS).
5. Zaplanowanie oraz przeprowadzenie szeregu eksperymentów i analiz porównawczych weryfikujących efektywność opracowanych algorytmów.

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

### **4. Uwagi i komentarze dotyczące rozprawy**

Uwagi ogólne:

1. W przedstawionej definicji Problemu Komiwożajera z Sąsiedztwami (którego dwa warianty rozważane są w rozprawie) zakłada się, że każdy punkt sąsiedztwa jest równoważny. Interesujące jest, czy opracowane właściwości można uogólnić dla problemu, w którym punkty bliższe środka okręgu danego klienta są bardziej priorytetowe? Innymi słowy czy prowadzone rozważania można uogólnić dla szerszej klasy problemów zakładającej różne priorytety punktów tworzących sąsiedztwa odwiedzanych klientów?

2. W trakcie rozprawy pominięta została analiza problemu z m-komiwojażerami. Problem taki z kolei został przedstawiony w rozdziale 8 jako przykład praktycznego zastosowania. Czy opracowane własności dotyczące rozmiaru redukcji problemu są również słuszne dla problemów TSP z m-komiwojażerami?
3. W rozdziale 8 przedstawiono możliwość wykorzystania opracowanych rozwiązań w rzeczywistych zastosowaniach. W tym kontekście interesująca wydaje się ocena możliwości implementacji opracowanych algorytmów w systemie doradczym. Czy z perspektywy przeprowadzonych badań można odpowiedzieć na przykładowe pytanie: Jak mógłby wyglądać proces wspierania decyzji w takim systemie?

Uwagi szczegółowe:

1. Brak stosownej korekty redakcyjnej dotyczy sposobów prezentacji rysunków. Większość z nich nie posiada legendy i opisu stosowanych oznaczeń - przyjęcie takiego sposobu prezentacji wyników bardzo utrudnia lekturę pracy.
  2. Kolejność odwołań do rysunków jest niezgodna z kolejnością ich numerowania np. rys. 4.1 i 4.2.
  3. Brak definicji niektórych ze stosowanych pojęć np. Euklidesowy Problem Komiwojażera, optymalny manewr Dubinsa, itp.
  4. Dla żadnego z algorytmów nie przedstawiono złożoności obliczeniowej.
  5. W rozprawie występują nieliczne błędy językowe i edycyjne: np. pusta linia na stronie 67
- Pomijając powyżej wymienione usterki należy zaznaczyć, że rozprawa jest zredagowana bardzo starannie, posiada właściwą strukturę i proporcje. Błędy stylistyczne występują sporadycznie.

## 5. Konkluzja

Reasumując stwierdzam, że w recenzowanej rozprawie doktorskiej pana mgr inż. Radosława Grymina rozwiązany został oryginalny problem badawczy, polegający na opracowaniu i analizie autorskich wersji algorytmów optymalizacji dyskretno-ciągłej. Doktorant wykazał się znajomością podstawowej literatury przedmiotu rozprawy, umiejętnościami: modelowania problemów marszrutyzacji, budowy i komputerowej implementacji metod optymalizacji dyskretnnej i ciągłej, a także umiejętnościami prowadzenia eksperymentów obliczeniowych.

Uważam, że opiniowana rozprawa spełnia warunki stawiane przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytule naukowym w określeniu do rozpraw doktorskich (Ustawę z dnia 3 lipca

2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce) w dyscyplinie **Elektronika, Automatyka i Elektrotechnika** i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

*Grzegorz Jozwiak*