

## Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji

### INSTYTUT TELEKOMUNIKACJI

Dr hab. inż. Piotr CHOŁDA

Kraków, dn. 4 kwietnia 2022 r.

### RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**Tytuł rozprawy: *A Comprehensive Optimization Model for Multi-hop Wireless Networks with Multicast Traffic***  
**Autor rozprawy: mgr inż. Bartłomiej Ostrowski**

#### 1. WSTĘP

Niniejszą recenzję sporządziłem w ramach postępowania o nadanie stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych. Postępowanie prowadzi Rada Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej (RD ITiT PW). Pierwszą wersję dokumentacji dot. rozprawy doktorskiej, wraz z informacją o powołaniu przez Radę Dyscypliny na recenzenta rozprawy, otrzymałem (za pośrednictwem poczty elektronicznej w imieniu Przewodniczącego RD, p. prof. dr. hab. inż. Jarosława ARABASA, prof. PW) w dn. 25 marca 2022 r. Potem dotarła do mnie także dokumentacja w wersji drukowanej.

Recenzowana rozprawa została złożona przez p. mgr. inż. Bartłomieja OSTROWSKIEGO i jest zatytułowana „A Comprehensive Optimization Model for Multi-hop Wireless Networks with Multicast Traffic”. Praca doktorska została w całości (poza krótkim streszczeniem) napisana w języku angielskim. Promotorem doktoratu jest p. prof. dr. hab. inż. Michał PIÓRO.

Dostarczona mi w wersji elektronicznej rozprawa doktorska liczy 144 strony. Składa się z dziesięciu numerowanych rozdziałów: 1. Introduction (str. 13-17), 2. Related work (str. 18-25), 3. Basic optimization model (str. 26-42), 4. Modulation and coding schemes assignment (str. 43-53), 5. Transmission power control (str. 54-67), 6. Energy consumption minimization (str. 68-78), 7. Packet delay minimization (str. 79-98), 8. Routing optimization - an alternative formulation (str. 99-109), 9. Destination nodes selection (str. 110-120), 10. Final comments (str. 121-123). Oryginalne wyniki uzyskane przez Doktoranta zostały przedstawione głównie w rozdziałach 4-9. Uzupełnieniem zawartości pracy są: zamieszczone na początku – streszczenie po angielsku i polsku, podziękowania; a także zamieszczone na końcu – ułożona w kolejności cytowania bibliografia, indeks używanych terminów, wykaz skrótów, spisy rysunków i tabel.

Recenzja została sporządzona w oparciu o obowiązujące Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce, z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. 30.08.2018 r. Poz. 1668) oraz Uchwałę Senatu PW nr 56/L/2020. Poniżej odnoszę się do różnych elementów oceny rozprawy doktorskiej, którymi zwyczajowo się posługuję (na podstawie formularza opracowanego kiedyś w Politechnice Warszawskiej).

**Akademia Górniczo-Hutnicza | Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji**  
**Instytut Telekomunikacji**

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,  
tel. +48 12 617 39 37, fax +48 12 634 23 72  
e-mail: [kt@agh.edu.pl](mailto:kt@agh.edu.pl), [www.agh.edu.pl](http://www.agh.edu.pl)

## 2. CEL BADAŃ. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora?

Zagadnienie naukowe dotyczy przede wszystkim telekomunikacji, ale znacznie poza ten obszar wykracza, gdyż obejmuje zagadnienia związane z metodami optymalizacyjnymi, algorytmiką i teorią złożoności. Praca w dużym stopniu ma charakter teoretyczny, ale jej potencjał aplikacyjny obejmuje zagadnienia związane z zarządzaniem (w tym projektowaniem) sieci radiowych, jak również zarządzaniem nimi. Zgodnie z tytułem rozprawy problematyka dotyczy więc transmisji typu jeden-do-wielu (*multicast*) w sieciach radiowych, w których sygnał jest przekazywany z użyciem węzłów pośredniczących (*multi-hop*). Szczególnie oryginalny aspekt dotyczy właśnie skupienia na transmisji multikastowej. Doktorant opracowuje szereg problemów dotyczących organizacji transmisji, na którą patrzy z punktu widzenia optymalizacji działania. Wkładem pracy w dziedzinę ITiT jest opracowanie szeregu zadań optymalizacji, które mają opisywać rzeczywiste warunki transmisji w sieciach opisanej wyżej.

Doktorant nie zdecydował się na sformułowanie tezy, ale nie stanowi to żadnej wady, a nawet jest całkiem naturalne w kontekście założonej koncepcji rozprawy. Otóż w obszarze zainteresowania Doktoranta jest szereg problemów związanych z organizacją transmisji multikastowej w sieciach radiowych korzystających w ramach transferu danych z licznych węzłów pośredniczących, w przypadku której to transmisji należy rozwiązać szereg zagadnień pomocniczych, jeśli chce się zrobić to dobrze, tj. zapewnić atrakcyjne warunki jakościowe, jak również związane z aspektem operatorskim. Obie grupy warunków są przedmiotem badań Doktoranta, który skupia się na następujących problemach:

- maksymalizacja efektywnej przepływności (*throughput*) uzyskiwanej w przedmiotowych sieciach;
- minimalizacja użycia energii urządzeń zaangażowanych w transmisję;
- minimalizacja opóźnień transmisyjnych wynikająca z zastosowania różnego rodzaju konfiguracji;
- zastosowanie różnego rodzaju schematów modulacji i kodowania, które są typowe dla transmisji radiowej (co wpływa na parametry energetyczne).

Zagadnienia nie koncentrują się zresztą tylko na tych czterech aspektach, gdyż są one ze sobą kombinowane, a ponadto w rozprawie rozpatrzono również inne problemy, które mają duże znaczenie z punktu widzenia organizacji samego sposobu poszukiwania rozwiązań optymalnych (szczegółowo piszę o tym w następnym rozdziale niniejszej recenzji).

Praca jest skonstruowana w taki sposób, że Doktorant wychodzi od sformułowania podstawowego zadania optymalizacji (które nie jest co do istoty jego autorstwa, ale które nieco przemodelował), a na którym nadbudowuje coraz bardziej złożone modele. Z tego punktu widzenia praca zapewnia jasność analizy, gdyż np. podejście, które łączyłoby naraz wszystkie opisywane zagadnienia, byłoby raczej nieczytelne i użycie go niekoniecznie wiele wnosiłoby poznawczo. Jest to tym bardziej słuszne, że niekiedy w przypadku praktycznego sterowania działaniem sieci i tak dekomponuje się zagadnienie na wiele mniejszych, które są rozwiązywane odrębnie.

Podjęty temat badawczy jest istotny od strony praktycznej, gdyż sieci, którymi zajmuje się Doktorant, są standaryzowane i mają zastosowane np. w przypadku tzw. Internetu Rzeczy (IoT). Przy formułowaniu zadań optymalizacji dąży się



do jasnego opisanego warunków, które są modelowane, co również ma miejsce w przypadku recenzowanej pracy doktorskiej.

### **3. CHARAKTER ROZPRAWY. Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

Rozprawa w oczywisty sposób ma charakter teoretyczny, gdyż przede wszystkim opiera się na formułowaniu szeregu zadań optymalizacji, które następnie są przez Doktoranta rozwiązywane (dokładnie lub w sposób suboptymalny). Użyty aparat teoretyczny dotyczy przede wszystkim zastosowań matematyki, w szczególności koncepcji związanych z programowaniem liniowym oraz jego pochodnymi (programowaniem całkowitoliczbowym, w zasadzie niepełnym całkowitoliczbowym, MILP), jak również z teorią dualizacji zadań optymalizacji. Pod pewnymi względami rozprawa zahacza również o zagadnienia złożoności algorytmicznej, jak również o problematykę konstrukcji rozwiązań trudnych zadań optymalizacji, chociaż w tym przypadku nie jest to problem kluczowy (ale uwypuklony w przypadku niektórych sformułowań).

Mimo zasadniczo teoretycznego charakteru przedstawionych badań na podkreślenie zasługuje fakt, że są one inspirowane autentycznymi problemami związanymi z projektowaniem sieci telekomunikacyjnych (i sterowaniem nimi). Tematyka dobrze wpisuje się więc w oba podobszary dyscypliny, tj. zarówno praktyczną telekomunikację, jak również informatykę techniczną.

### **4. SPOSÓB PRZEPROWADZENIA ANALIZY ŹRÓDEŁ. SPOSÓB SFORMUŁOWANIA WNIOSKÓW WYNIKAJĄCYCH Z ANALIZY ŹRÓDEŁ. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadczący o dostatecznej wiedzy Autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?**

Analizie literatury został poświęcony wyodrębniony rozdział 2, dzięki czemu jest ona przeprowadzona w sposób systematyczny i pełny. Zauważyłem, że ostatnio niestety rezygnuje się z takiego podejścia w przypadku doktoratów broniących w dyscyplinie ITiT, więc tym bardziej doceniam sposób potraktowania sprawy przez Doktoranta. Sama rozprawa jest oparta na około 91 pozycjach literaturowych (część jest omyłkowo wyszczególniona dwa razy), z których przeważająca część jest omówiona jako tło literaturowe w ramach wspomnianego rozdziału. Dobór omawianej literatury jest trafny, są to wszystko pozycje obecne w międzynarodowym obiegu naukowym i adekwatne w odniesieniu do tematyki. W odniesieniu do tekstów dotyczących zbliżonych zagadnień widać, że tematyka jest aktualna.

W ramach opisu literaturowego Doktorant skupił się na krótkiej charakterystyce dostępnych technik transmisyjnych, które stanowią dla niego inspirację do formułowania zadań optymalizacji, jak również na opisie podejść, które są proponowane (sposób modelowania oraz rozwiązywania zadań optymalizacji). Przede wszystkim Doktorant skupia się na różnych warunkach działania, które wymagają modelowania w przypadku użycia podejścia optymalizacyjnego i którymi sam Doktorant też się zajmuje (maksymalizacja przepływności, minimalizacja



zużycia energii oraz opóźnień itd.). Autor rozprawy przekonująco pokazuje, że są to zagadnienia istotne oraz dowodzi, że uzyskane przez niego wyniki są oryginalne. Ze względu na przyjęty charakter pracy Doktorant skupia się przede wszystkim na takich artykułach, które proponują różnego rodzaju podejścia optymalizacyjne, co jest tutaj uzasadnione. Doktorant wykazuje, że ma wiedzę odnoszącą się do tematyki od strony zarówno praktycznej (np. działanie różnych protokołów związanych z badanymi technikami), jak również – i przede wszystkim – od strony teoretycznej, która ewidentnie stanowi obszar jego specjalizacji.

Nie mam wątpliwości, że Doktorant zna i stosuje odpowiednią literaturę przedmiotu, która stanowi również inspirację do przedstawionych badań. Po stronie pewnych wad przeglądu warto wskazać, że mimo mojego poczucia, iż nie pominięto istotnych elementów dorobku literaturowego, zasadne byłoby przytoczenie fundamentalnych pozycji książkowych (lub artykułów naukowych) dotyczących w ogóle zoptymalizowanego projektowania sieci, gdyż w przypadku pracy teoretycznej jest jasne, że duża część wiedzy jest zawarta w tego rodzaju pozycjach. Zasadne byłoby również tabelaryczne zestawienie najważniejszych pozycji literaturowych, które w ogóle są porównywalne tematycznie z pracą doktorską, jeśli chodzi o dobór zagadnień oraz używanych metod, a przy tym czytelne wskazanie różnic (które są wprawdzie przedstawione, ale rozproszone w tekście rozdziału). Mogłoby to posłużyć do czytelnego uwypuklenia wkładu rozprawy w dziedzinę. Na koniec, chciałbym zwrócić uwagę na nieco egzotyczne jak na doktorat zakończenie przeglądu literatury, które być może pasuje do artykułu naukowego, chociaż w ogóle brzmi podejrzanie: „to the best of our knowledge, this thesis is an original work that provide a comprehensive optimization model for...”. Myślę, że cały tekst rozdz. 2 dowodzi takiej tezy i nie warto jej w ten sposób podsumowywać.

##### **5. ROZWIĄZANIE PRZEDSTAWIONEGO ZADANIA, WŁAŚCIWOŚCI PRZYJĘTYCH METOD I ZAŁOŻEŃ. Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?**

Podejście do konstrukcji modeli optymalizacyjnych jest konsekwentne i podąża za schematem przedstawionym w odniesieniu do podstawowego modelu, który wprowadzono w rozdziale 3. Wiadomo, co zresztą Doktorant wiele razy podkreśla, że podstawowe zadanie optymalizacji nie zostało przez niego opracowane, a jedynie przeformułowane. Jest ono jednak twórczo rozwijane w różnych kierunkach, co stanowi atrakcyjny aspekt raportowanych w ramach rozprawy badań.

Przyjęte przez Doktoranta podejście polega na opisie transmisji multikastowej jako opartej na strumieniu danych przesyłanych w ramach wybranego poddrzewa, w którym liście to klienci końcowi, a węzły pośredniczące mogą przysyłać dane z użyciem techniki radiowej, przy czym ze względu na założony model transmisyjny węzły pośredniczące nie mogą jednocześnie nadawać i odbierać pakietów. Podstawowe i słusznie przyjęte założenie polega na tym, że pakiety są przysyłane w kolejnych szczelinach czasowych (sposób transmisji opiera się na wielodostępie z podziałem czasu TDMA). Doktorant dopuszcza jednak zastosowanie różnych schematów modulacji oraz kodowania sygnału. Ze względu na wskazany sposób transmisji należy wyróżnić podzbiory wierzchołków omawianego poddrzewa, które określają, w jaki sposób w różnych szczelinach czasowych może następować przekaz danych. Odpowiednie uszeregowanie czasowe transmisji w tych podzbiórach (tzw. c-



*sets, compatible sets*), tak żeby transmisje nie nakładały się przestrzennie, zapewnia poprawną transmisję całego multikastowego strumienia danych. Znalezienie najkorzystniejszych konfiguracji tych podzbiorów umożliwia znalezienie najkrótszej długości tzw. ramki transmisyjnej (*frame*), co z kolei przekłada się na maksymalizację przepływności (im krótsza ramka, tym więcej danych można przesłać w jednostce czasu). Tyle od strony założeń technicznych, natomiast podejście jest związane z całym ciągiem zadań optymalizacji, na których skupia się praca Doktoranta. Ze względu na fakt, że sformułowanie ma charakter tzw. niekompaktowy (*noncompact*), tzn. nawet jego rozwiązanie optymalne nie daje być może rozwiązania najlepszego z możliwych, co wynika z niemożliwości użycia wszystkich teoretycznie dostępnych podzbiorów *c-sets* (byłoby ich zbyt dużo), należy zastosować częstą w takich przypadkach technikę spotykaną w przypadku generacji kolumn, co wymaga podejścia opartego na dualizacji Lagrange'a. Z kolei zadanie dualne (oparte na relaksacji wyjściowego zadania, które wymaga niestety użycia kłopotliwych z punktu widzenia algorytmicznego zmiennych zero-jedynkowych) pozwala na dogenerowanie nowych podzbiorów *c-sets*. W tym celu należy sformułować kolejne, pochodne (już trzecie) zadanie optymalizacji, którego wersja zdualizowana jest finalnie używana do wytworzenia nowego kandydata do podzbioru *c-sets*. Taka procedura jest wykonywana iteracyjnie aż do uzyskania zbieżności. Cała ta koncepcja, bardzo zaawansowana z punktu widzenia optymalizacji, jest niezwykle pomysłowa i umożliwia efektywne rozwiązywanie nietrywialnych zadań optymalizacji. Doktorant wykorzystuje potencjał tego podejścia w ramach szeregu zadań pochodnych.

Wskazane wyżej podejście jest używane w kolejnych rozdziałach (4-9), przy czym w odniesieniu do nich Doktorant jest autorem poszczególnych konkretnych modeli, które służą uwzględnieniu i urealistycznieniu różnych aspektów technicznych zagadnienia optymalizacji sieci radiowych z uwzględnieniem multikastu. I tak w kolejnych rozdziałach Doktorant uwzględnia użycie różnych rodzajów modulacji oraz kodowania (rozdział 4), biorąc pod uwagę unikanie zbyt niskich poziomów sygnału do szumu, co wiąże się z wyznaczeniem w określony sposób podzbiorów *c-sets*. W rozdziale 5 Doktorant bierze pod uwagę sposób sterowania poborem mocy, co w ramach tego rozdziału przekłada się nadal na zagadnienie szybkości przekazywania danych (chodzi o kwestię uwzględnienia geograficznego zakresu transmisji). W rozdziale 6 Doktorant za to wprost formułuje zadania związane z minimalizacją użycia energii. W rozdziale 7 Doktorant z kolei uwzględnia główny parametr jakościowy, tj. minimalizację opóźnień. W rozdziale 8 Doktorant rozszerza iteracyjne generowanie struktur potrzebnych do opracowania rozwiązania optymalnego o poddrzewa niezbędne do multikastu. Na koniec Doktorant nieco odchodzi od transmisji multikastowej, zakładając że w ramach strumieni w konkretnych poddrzewach można dokonać transmisji typu anykastowego (choć nie według paradygmatu jeden-do-jednego-z-wielu, a do podzbioru wybranego z maksymalnego zbioru klientów; oczywiście takie podejście uwzględnia też klasyczny anykast).

W przypadku doboru schematów modulacji/kodowania Doktorant rozważa realistycznie dwa podejścia: dynamiczne (elastyczny wybór w różnych chwilach czasowych) i statyczne (wybór jednorazowy). To pierwsze podejście wprawdzie pozwala na sformułowanie łatwiejszych zadań optymalizacji, ale nie jest w pełni realistyczne. Drugie podejście jest wprawdzie praktyczne, ale wiąże się z dużo większymi trudnościami algorytmicznymi w ramach poszukiwania rozwiązania optymalizacyjnego. Dlatego Doktorant rezygnuje z jego rozwiązywania, chociaż



w przypadku innego rodzaju trudnego zadania optymalizacji konstruuje heurystykę, która ma dostarczać wyniki suboptymalne (jak się potem okaże w rozdz. 5 nie jest to potrzebne ze względu na charakter uzyskiwanych wyników).

Sposób sterowania mocą jest powiązany z używanymi schematami modulacji/kodowania, co z jednej strony pozwala uwzględnić praktyczny kontekst ograniczeń występujących w przypadku transmisji, a ponadto jest przykładem realizacji koncepcji kumulatywnego tworzenia zadań optymalizacji, gdzie coraz bardziej skomplikowane wersje są nadbudowywane na zadaniach prostszych. Takie podejście nie jest wprawdzie konsekwentnie stosowane w przypadku wszystkich rozdziałów, ale Doktorant pokazuje, że można byłoby je zastosować, by w przewidywalny sposób rozszerzając wskazane sformułowania. Myślę, że istotnie uwzględnienie wszystkich aspektów na raz mogłoby raczej zaciemniać obraz niż go rozjaśniać, chociaż interesujące byłoby zobaczyć nawet nie same sformułowania w najbardziej rozszerzonej wersji, a dostarczane dzięki nim wyniki. Sterowanie mocą jest modelowane z użyciem dyskretnych poziomów mocy oraz poziomów ciągłych. Na końcu rozdziału 5 Doktorant zamieścił wyniki liczbowe pokazujące na wybranych sieciach rozwiązania uzyskane z użyciem modeli opracowanych w rozdz. 4-5. Przykłady te są bardzo interesujące, gdyż nie tylko ilustrują, że sformułowane zadania są rozwiązywalne dosyć szybko – na poziomie w najgorszym przypadku kilkunastu minut dla całkiem pokaźnych sieci (co nie jest takie oczywiste, biorąc pod uwagę, że angażują zmienne nieciągłe), ale ich charakter jakościowy też dostarcza ważnych danych. Mianowicie, pokazują one, jak poważne zyski daje użycie sformułowanych zadań optymalizacji, co oczywiście podkreśla praktyczną istotność wyników pracy. Pokazują również, że użycie uproszczonego podejścia (uciągniętych poziomów mocy) nie stanowi w praktyce problemu (ale za to ułatwia rozwiązywanie zadań).

Podejście do oszczędności energii zaprezentowane w rozdziale 6, mimo że mogłoby być kombinowane z opcjami stosowanymi w rozdz. 5, opiera się jednak nie na doborze schematów modulacji/kodowania, a na uwzględnieniu różnego rodzaju trybów pracy urządzeń, co oczywiście wpływa na konsumpcję energii. Również w tym przypadku, poza sformułowaniem odpowiednich zadań optymalizacji, Doktorant pokazuje, jak wyglądają rozwiązania optymalne na syntetycznie wygenerowanych sieciach. Szczególnie wartościowe jest skupienie się na kompromisie między minimalizacją energii a maksymalizacją przepływności i na pokazaniu, że nie jest to w przeciwieństwie do wielu takich sytuacji, z którymi mamy w praktyce do czynienia w zarządzaniu sieciami, dramatyczny kompromis i można znaleźć rozwiązania zadowalające z punktu widzenia obu aspektów.

Podejście do kwestii jakościowych, najobszerniej opracowane w rozdz. 7, jest oparte na minimalizacji najwyższego poziomu opóźnień zbieranego po wszystkich strumieniach multikastowych. Mimo że istnieją inne podejścia (o czym wspomina Doktorant), to można uznać przyjęte za jak najbardziej akceptowalne. Ze względu na fakt, że dokładne rozwiązanie sformułowanego zadania optymalizacji jest niemożliwe dla dużych instancji Doktorant przedstawił heurystykę niedeterministyczną opartą na symulowanym wyżarzaniu. Ze względu na fakt, że przeszukiwanie sąsiedztwa ogranicza zbiór możliwych rozwiązań, istotne w ramach heurystyki jest startowanie z różnych punktów przestrzeni rozwiązań dopuszczalnych. Przedstawione wyniki numeryczne dowodzą, że heurystyka dobrze się sprawdza, co dowodzi umiejętności Doktoranta w zakresie praktycznego rozwiązywania trudnych zadań optymalizacji, które są związane z badaniami przedstawionymi w ramach rozprawy.



Zaprezentowane w rozdz. 8 podejście związane z generowaniem dopuszczalnych drzew multikastowych jest w swojej istocie problemem poszukiwania optymalnego trasowania w sytuacji, gdy wyszukiwanie wszystkich możliwych poddrzew nie jest trywialne, co wymaga ponownego spojrzenia na niekompaktowy charakter przyjętego podejścia optymalizacyjnego. Doktorant atakuje problem z użyciem dwóch koncepcji formułowania zadań optymalizacji, przy czym jedna zakłada naiwną relaksację liniową (która nie sprawdza się w praktyce, ze względu na zbyt duży odstęp relaksacji w stosunku do rozwiązania dokładnego, które musi opierać się na użyciu zmiennych nieciągłych), a druga pozwala na dostarczenie bardziej realistycznych wyników. Następnie na tej podstawie nadbudowane zostaje całe podejście iteracyjne, w którym kolejno generowane są nie tylko nowe podzbiory *c-sets*, ale także nowe dopuszczalne poddrzewa służące do trasowania danych.

Ostatnia z grup modeli, przedstawiona w rozdz. 9, dotycząca przesyłania danych do wybranego podzbioru węzłów końcowych, powraca do wyjściowego podejścia, w ramach którego poszukuje się przede wszystkim maksymalizacji przepływności w oparciu o minimalizację ramki transmisyjnej. Jest to zagadnienie nieco poboczne w stosunku do poprzednich zagadnień i w zasadzie mogłoby otwierać całą grupę kolejnych problemów pochodnych, a w tym przypadku pokazuje elastyczność użytych modeli, które mogą być dostosowane – jak widać – do różnych kontekstów technicznych i potrzeb transmisyjnych.

W ramach oceny podejścia od strony merytorycznej stwierdzam, że przedmiotem rozprawy doktorskiej p. Bartłomieja Ostrowskiego jest oryginalne rozwiązanie szeregu nietrywialnych problemów naukowych. Jak widać, jest ich dużo i pokrywają różne istotne zagadnienia związane z transmisją skupioną wokół multikastu w sieciach radiowych. Zadania optymalizacji są definiowane przejrzyście i z dużą kreatywnością, co w przypadku takich zagadnień technicznych na pewno oznaczało zmierzenie się z istotnymi trudnościami, gdyż sformułowanie poprawnie opisującego sytuację modelu, który na dodatek będzie efektywnie rozwiązywalny, jest wysoce nietrywialne i wymaga dużego doświadczenia w zakresie metod optymalizacji. Takiego doświadczenia wymagało też opracowanie sposobu rozwiązania sformułowanych zadań. Moja ocena przedstawionych wyników jest więc jak najbardziej pozytywna: Doktorant wybrał do opracowania ważne zagadnienia, podszedł do nich w sposób poprawny, a przyjęte sposoby rozwiązania oraz założenia, szczególnie w aspekcie optymalizacyjnym są dobrze uzasadnione i zgodne z przyjętą metodologią. Podejście jest w ogólności oryginalne, przedstawione zagadnienia są ciekawe, a zajęcie się nimi jest jak najbardziej zasadne nie tylko z punktu widzenia teoretycznego, ale również praktycznego. Właśnie z praktycznego punktu widzenia podkreśliłbym przede wszystkim aspekty dotyczące minimalizacji zużycia energii oraz poprawę parametrów jakościowych (tutaj przede wszystkim nacisk na zwiększenie efektywnej przepływności oraz minimalizację opóźnień).

Jak to zwykle bywa z działalnością badawczą, nigdy się ona nie kończy, a pod pewnymi względami można byłoby ją zawsze poprawiać. Tak jest i w tym przypadku. Poniżej wskazuję kilka aspektów, które wymagałyby albo nieco bardziej rozbudowanego podejścia w zakresie przedstawiania wyników liczbowych albo po prostu bardziej wyczerpującej dyskusji (założeń, wyników itd.). Wydają mi się one szczególnie istotne, także jako punkty do omówienia w ramach publicznej obrony dysertacji.

- Ze względu na fakt, że niektóre z zadań optymalizacji są w praktyce nierozwiązywalne i Doktorant posługuje się np. ich relaksacją, stanowią



one z punktu widzenia parametrów jakościowych ograniczenie górne, co jest uczciwie podkreślane kilka razy. Trzeba jednak zwrócić uwagę, że z punktu widzenia jakości przydatne byłoby również uzyskanie ograniczeń dolnych. Byłoby pożądane, gdyby Doktorant bardziej wyczerpująco przedyskutował również takie zagadnienie.

- Przykłady liczbowe mają dużą wartość, gdyż ilustrują z jednej strony, że sformułowane modele mogą przydać się do lepszego zrozumienia działania opracowywanych w standardach sieci, ale też – z drugiej strony – wspierają doświadczalnie proponowane przez Doktoranta rozwiązania oraz uogólniane przez niego konkluzje. W kontekście podniesienia wiarygodności wniosków wyciąganych na podstawie konkretnych doświadczeń numerycznych zasadne jest w pełni przekonać do przyjętych założeń oraz przedstawić bogatą gamę wyników. Mimo że Doktorant prowadzi obliczenia na pewnej liczbie sieci, zasadne byłoby także:
  - ujednoczyć między rozdziałami używany sposób generowania wyników liczbowych (Doktorant opiera się na różnych topologiach syntetycznych w różnych rozdziałach); rozumiem, że rozdziały są często oparte na różnych artykułach, ale nie wiem, dlaczego w odniesieniu do tekstu rozprawy Doktorant nie zdecydował się przedstawić spójnie tego aspektu; jeśli natomiast z punktu widzenia różnych zadań istotne jest użycie konkretnych topologii, należało ten aspekt uwypuklić;
  - zwiększyć liczbę sieci, na których dokonywane są obliczenia; poprawiłoby to wiarygodności uzyskiwanych wyników – rozumiem, że w niektórych przypadkach nie jest to trywialne, gdyż obliczenia zabierają немало czasu, ale biorąc pod uwagę długość trwania obliczeń, które zresztą były niekiedy ograniczane np. do 3 godz., można powiedzieć że nawet użycie 10 razy więcej sieci nie zwiększyłoby chyba czasu pracy nad doktoratem w istotny sposób;
  - obliczenia są dokonywane na różnego rodzaju infrastrukturach obliczeniowych, co nie zapewnia ich porównywalności (np. Doktorant używa tego samego sprzętu w przypadku rozdz. 5 i 6, ale innego w przypadku rozdz. 7);
  - poszerzyć zakres parametrów, które są nastawiane w celu uzyskania wyników liczbowych; decyzje nt. wyboru konkretnych wartości parametrów (np. odległość referencyjna  $d_0$  w rozdz. 5) nie są wprawdzie kontrowersyjne, ale jest ewidentne że mogłoby zostać też dokonane w inny sposób – tutaj, podobnie jak w przypadku mojej zawartej wyżej krytyki nt. liczby badanych sieci, warto byłoby po prostu pracować z bardziej zróżnicowanymi parametrami, ewentualnie poprzez konkretne decyzje cytowaniami z wybranych standardów albo po prostu prac naukowych, które postulują stosowanie konkretnych wartości jako kluczowych (choć w ogólności rzadko tylko jedna wartość parametru jest powszechnie istotna);
  - podobnie wybór niektórych parametrów w przypadku stosowanych heurystyk jest niezbyt zróżnicowany; trzeba pamiętać, że zbliżony problem wyboru parametrów początkowych czy w ogóle hiperparametrów w różnych algorytmach jest rozwijającą się





dziedziną np. w ramach uczenia maszynowego i można było spróbować inspirować się nimi np. w odniesieniu do wyboru temperatury początkowej ( $\theta$ ) czy współczynnika zmiany temperatury ( $a$ ) w przypadku heurystyki opartej na symulowanym wyżarzaniu.

- Doktorant w zasadzie nie skupia się na zagadnieniach związanych z mobilnością, mimo że w zasadzie dopuszcza, aby klienci końcowi poruszali się (pisze o tym np. na str. 14). Oczywiście pełne uwzględnienie mobilności węzłów zapewne wiązałoby się z opracowaniem zupełnie innych modeli (a nawet nie jest pewne, czy byłoby to możliwe) oraz potrzebą sformułowania w ogóle odmiennego zestawu zagadnień badawczych, co wcale nie jest konieczne w przypadku tej pracy. Tutaj jako zarzut sformułowałbym tylko niezbyt głębokie odniesienie do zagadnienia w kontekście przedstawionej przez Doktoranta analizy czasów obliczeń. Otóż jeśli są one na poziomie minut, to niekoniecznie przedstawione zadania optymalizacji nadawałyby się do zastosowania w przypadku dynamicznego sterowania siecią, w których po prostu następuje szybka zmiana topologii. Szkoda, że Doktorant nie poświęcił miejsca dyskusji takiej sytuacji. W tym kontekście zasadne byłoby po prostu już na początku sformułowanie praktycznych scenariuszy użycia przedstawionych zadań optymalizacji.

**6. ORYGINALNOŚĆ ROZPRAWY, SAMODZIELNY DOROBK AUTORA, POZYCJA ROZPRAWY W STOSUNKU DO STANU WIEDZY (POZIOM TECHNIKI) PREZENTOWANEGO W LITERATURZE ŚWIATOWEJ. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?**

Praca charakteryzuje się dużym walorem oryginalności. Przede wszystkim Doktorant zajmuje się nietrywialnym zadaniem transmisji jeden-do-wielu, które jest trudniejsze w modelowaniu w stosunku do standardowego podejścia unicastowego. Po drugie, w ogóle podejście do optymalizacji sieci radiowych z użyciem modelowania opartego na programowaniu liniowym niesie trudności związane z efektywnym sposobem rozwiązywania takich problemów. Doktorant dobrze sobie z nimi poradził, z jednej strony efektywnie stosując podejście w oparciu o relaksację i dualizację, a z drugiej strony dowodząc że umie projektować poprawnie działające i skuteczne heurystyki dostarczające wyniki suboptymalne. Samodzielny dorobek polega więc z jednej strony na wprowadzeniu szeregu użytecznych zadań optymalizacji, które poprawnie opisują różne istotne aspekty sieci, którymi zajmuje się Doktorant, a z drugiej strony na ich rozwiązaniu oraz zanalizowaniu. Praca dowodzi umiejętności Doktoranta w zakresie samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Warto wspomnieć również o tym, że praca w przeważającym stopniu powstała na podstawie opublikowanych wcześniej artykułów, których współautorem jest Doktorant. Dotyczy to wymienionych w bibliografii pozycji [1], [70], [72], [77], [81], z których niektóre ukazały się w prestiżowych periodykach naukowych z obszaru telekomunikacji (tu warto wskazać przede wszystkim *Ad Hoc Networks* oraz *Sensors*), ale również w formie referatów na uznanych konferencjach



międzynarodowych. Świadczy to o wysokim poziomie uzyskanych wyników w kontekście tła reprezentowanego przez literaturę światową.

**7. POPRAWNOŚĆ PRZEDSTAWIENIA UZYSKANYCH WYNIKÓW. Czy Autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?**

Wyniki są przedstawione poprawnie. Doktorant jasno tłumaczy przedstawione zadania optymalizacji, co nie jest w ogóle zadaniem trywialnym. W szczególności wyniki o charakterze liczbowym są sprawnie i wiarygodnie zanalizowane. Język angielski, którym napisano pracę, jest mimo pewnych potknięć, zasadniczo poprawny. Na pochwałę zasługuje też sposób opisu zadań optymalizacji, np. konsekwentne odróżnianie stałych (pisanych wielką literą z indeksacją w nawiasie) oraz zmiennych (pisanych małą literą z indeksacją dolną lub górną). To na pewno poprawia czytelność dla osoby, która pierwszy raz widzi sformułowane zadania optymalizacji. Doktorant dosyć skrótowo opisuje w niektórych przypadkach znaczenie poszczególnych ograniczeń, szczególnie gdy ich typ się powtarza (co ma miejsce w wielu przypadkach). Być może byłoby zasadne, żeby z tego punktu widzenia wydłużyć tekst, ale uczynić go nieco przystępniejszym w odbiorze dla czytelnika, który przecież widzi całość tekstu po raz pierwszy.

Kilka dostrzeżonych przeze mnie niedoróbek na poziomie edycyjnym zamieszczam poniżej. Na pewno gdyby Doktorant przygotowywał erratę do doktoratu, warto byłoby je uwzględnić. Nie stanowią one jednak realnej przeszkody w rozumieniu tekstu pracy.

- Sposób podawania zadań optymalizacji:
  - Pechowo w podstawowym sformułowaniu zadania optymalizacji Doktorant omyłkowo zmienił charakter funkcji celu (z minimalizacji na maksymalizację). Jest to oczywiste przeoczenie, co widać w poprawnym sformułowaniu zadania dualnego oraz w kolejnych sformułowaniach, które stanowią rozwinięcie koncepcyjne sformułowania bazowego.
  - Kwestia linearyzacji ograniczeń, w których występuje mnożenie zmiennych (dwuliniowość) – sama linearyzacja jest zawsze dokonywana poprawnie, ale warto zwrócić uwagę, że są przypadki w których wystarczą tylko ograniczenia górne (bo np. zmienna która ma odpowiadać wartości wyniku z mnożenia dwóch innych zmiennych i tak występuje w określonym typie funkcji celu – jak w przypadku zadania 3.11), a niekiedy trzeba zapewnić także ograniczenie dolne (jak w przypadku zadania 4.12). Ze względu na czytelność prezentacji modeli optymalizacyjnych warto byłoby, gdyby Doktorant poświęcił tego rodzaju subtelnościom więcej miejsca (tzn. wytłumaczeniu sposobu linearyzacji w tym przypadku).
  - Niekiedy dobór oznaczeń bywa nie do końca szczęśliwy, np.:
    - litera  $G$  w sformułowaniu 5.2 jest najwyraźniej raz używana w odniesieniu do stałej ( $G(w,u)$ ) a innym razem zmiennej ( $G_{sw}^m$ );



- te same oznaczenia literowe są używane w odniesieniu do odmiennych wielkości w ramach różnych sformułowań (np. litera  $p$  na oznaczenie mocy w rozdziale 5 oraz na oznaczenie zmiennej pomocniczej służącej do poradzenia sobie z dwuliniowością w rozdziale 8); powiedziałbym, że Doktorant nie wykorzystał chyba całego potencjału alfabetu greckiego (jego małych i wielkich liter).
- Niepełne lub niekonsekwentne tłumaczenie pewnych koncepcji, z których niektóre są istotne w kontekście tej konkretnej pracy doktorskiej:
  - W zasadzie Doktorant nie tłumaczy dokładnie, co rozumie pod pojęciem transmisji multikastowej, ani jak jest ona organizowana z punktu widzenia konkretnych protokołów telekomunikacyjnych. Oczywiście pojęcie transmisji jeden-do-wielu stanowi zasób podstawowej wiedzy inżyniera telekomunikacji, ale dla porządku byłoby jednak przydatne głębsze przedstawienie tej koncepcji, skoro stanowi nawet tytułowy rdzeń pracy.
  - W zasadzie podobna sytuacja ma miejsce w przypadku pojęcia *multi-hop*, które może i nawet jest przedstawione *implicite* w ramach kontekstu, np. opisu optymalizacyjnego, ale w sumie nie jest wprost zdefiniowane i objaśnione od strony aspektów operacyjnych.
- Bibliografię zestawiono według klucza opartego na kolejności cytowania, a nie według nazwiska pierwszego autora tekstu. To drugie podejście jest raczej popularniejsze w przypadku prac typu monograficznego, co wynika po prostu z ułatwienia czytelnikowi znalezienia konkretnej pozycji, jeśli chce do niej wrócić (jak również chroni przed omyłkowym zduplikowaniem pozycji, co niestety wydarzyło się tutaj). Doktorant zrezygnował z tego podejścia i podążył za koncepcją, która raczej jest stosowana w przypadku artykułów naukowych (w których bibliografia jest jednak zazwyczaj krótsza).
- Niewielkie niedopatrzenia redakcyjne, typograficzne, językowe, literówki, ew. kontrowersyjne decyzje dotyczące sposobu pisania itd.:
  - w ramach pracy Doktorant zdecydował się posługiwać 1 os. l. mn. w przypadku określania autorstwa koncepcji przedstawionych w ramach doktoratu (np. „Finally, we explain...” na str. 13 czy „our model” na str. 16), co nie jest naturalne, gdyż praca doktorska stanowi przecież jego własny dorobek;
  - niepoprawne końcówki w słowach angielskich:
    - w 3 os. l. poj. czasu Simple Present (np. „our model include...” na str. 16, „an original work that provide...” na str. 25 czy „a c-set that maximize” na str. 41) – dostrzegłem kilka razy taki błąd;
    - w strukturze przydawkowej (np. „verticals sectors” na str. 13) – rzadki błąd w pracy;
  - konsekwentne niekończenie wypunktowań średnikiem lub przecinkiem, mimo że ostatni punkt jest zamykany kropką, a więc całość wypunktowania jest traktowana jako zdanie (np. na str. 16);
  - przy użyciu formalnego języka technicznego pracy zasadne byłoby zrezygnowanie z anglojęzycznych skrótów (na str. 40 użyto

- „won't”) – o ile jednak widzę, praca jest zasadniczo wolna od tego uchybienia;
- na str. 39 błędnie zapisano jeden z indeksów dolnych („Zzwa” zamiast „Zswa”) – jest to jednak chyba jedyna prawdziwa literówka, którą dostrzegłem w całej pracy;
  - potknięcia w ramach opisu bibliograficznego:
    - brak spójności w poszczególnych opisach, przede wszystkim w odniesieniu do artykułów konferencyjnych (np. podawanie pełnej nazwy – jak w przypadku [8], [37] – oraz jedynie skrótu – jak w przypadku [13], [55]), ale niekiedy także artykułów, które ukazały się w periodykach naukowych (np. podanie pełnego tytułu periodyku w przypadku [10] oraz tylko wersji skróconej w przypadku [12]);
    - niejasna koncepcja podawania identyfikatorów DOI (czasem są udostępnione, a niekiedy nie, chociaż trudno uwierzyć, że nie istnieją – np. w odniesieniu do [12]), bywa że są podawane dwa razy w różnej postaci dla tej samej pozycji (np. [31]), w ogóle dyskusyjne jest ich podawanie z innym adresem dostępu do tekstu (jak np. w przypadku [9]);
    - co najmniej dwie pozycje literatury są zduplikowane w spisie bibliograficznym, dotyczy to tożsamyh pozycji [16] i [30] oraz [41] i [71];
    - występujące niekiedy użycie małych zamiast wielkich liter w tytułach (przede wszystkim w odniesieniu do różnego rodzaju skrótów, np. „5g” w przypadku [2], [4] i [23], „Tdma” w przypadku [16], [17], [32], [34] czy [35]; „iot” w [43] albo „wmn” w przypadku [27]; podobnie „sdn” w [83]-[85]; ewentualnie „sensorcomm” w przypadku nazwy konferencji, z której pochodzą artykuły [16] i [30]); nieco zbliżony problem to zapis „poisson” w tytule [86];
    - niestandardowy opis artykułów konferencyjnych (rezygnacja z podania dokładnych dat trwania konferencji oraz miejsca odbycia);
    - brak daty opublikowania raportu [4];
    - zagadkowe „SN” w przypadku tytułu periodyku, w którym opublikowano [15];
    - nie podano charakteru tekstów [21] oraz [74].

Myszę, że znaczna część tych potknięć wynika po prostu z faktu, że praca opiera się na tekstach różnych artykułów naukowych Doktoranta, co samo w sobie jest przecież jak najbardziej pożądaną sytuacją.

#### **8. SŁABE STRONY ROZPRAWY, JEJ GŁÓWNE WADY. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?**

Doktorant nie ustrzegł się pewnych słabszych stron, o których pisałem już wcześniej. Poniżej więc tylko skrótowo je zestawiam. Nie uważam jednak żadnych z wymienionych wad za istotne.



- O ile od strony teoretycznej przedstawione zadania optymalizacji są imponujące ze względu na pomysłowość modelowania, o tyle zastosowanie tych modeli w praktyce nie jest przedmiotem wyczerpującej konceptualizacji w ramach pracy doktorskiej. Byłoby jednak wartościowe, gdyby Doktorant przedstawił konkretne scenariusze użycia proponowanych modeli optymalizacyjnych. Z tekstu nie wynika w zasadzie, czy proponowane podejście dotyczy zarządzania siecią czy sterowania nią oraz jaki będzie wpływ np. mobilności urządzeń na potrzebę przeliczania konfiguracji (w szczególności jak często należałoby to robić—to ważny aspekt, choćby dlatego, że Doktorant dyskutuje czasy obliczeń).
- Doktorant przedstawia szereg interesujących przykładów obliczeniowych, które z jednej strony pokazują ciekawe fenomeny występujące w projektowanych sieciach, a z drugiej strony wspierają wnioski dotyczące wysokiej jakości przedstawionych pomysłów (np. w odniesieniu do poprawy niektórych modeli lub sposobów poszukiwania rozwiązań suboptymalnych). Byłoby jednak zasadne ujednoczyć sposób prowadzenia badań ilościowych np. z użyciem tych samych założeń (typy i wielkości użytych sieci), jak również parametrów. Pożądane byłoby również przeprowadzenie badań z szerszym zakresem parametrów, a w każdym razie z bardziej przekonującym uzasadnieniem (np. w oparciu o istniejącą literaturę przedmiotu), dlaczego użyto takich a nie innych wartości parametrów.
- Nieco niedoróbek edycyjnych, które wynikają zapewne po części z faktu kompilowania treści rozprawy doktorskiej z różnych artykułów badawczych opublikowanych wcześniej przez Doktoranta.

## **9. PRZYDATNOŚĆ ROZPRAWY DLA NAUK TECHNICZNYCH, PRZEMYSŁU, OBRONNOŚCI KRAJU ITP.**

Jako praca teoretyczna doktorat ma znaczenie przede wszystkim w odniesieniu do zastosowań metod optymalizacyjnych w telekomunikacji. Jako szczególnie atrakcyjny uzysk wskazałbym przede wszystkim szereg oryginalnych i pomysłowych zadań optymalizacji, które Doktorant sformułował w ramach prac.

Podkreślam jednak, że praca ma również przydatność przemysłową ze względu na fakt, że te zadania optymalizacji są inspirowane autentycznie standaryzowanymi oraz używanymi technikami radiowymi i to w zakresie, który niezbyt często jest przedmiotem namysłu od tej strony (multikast). Ponadto Doktorant pokazuje, jakie zyski o charakterze jak najbardziej praktycznym (wskazałbym tu przede wszystkim oszczędności energii), można osiągnąć dzięki proponowanemu przez niego podejściu.

## **10. PODSUMOWANIE (CZY ROZPRAWA SPEŁNIA WYMAGANIA PRZEZ OBOWIĄZUJĄCE PRZEPISY)**

Moim zdaniem recenzowana rozprawa doktorska przedstawia istotne problemy oraz rozwiązania w zakresie zastosowań metod optymalizacji w odniesieniu

do projektowania sieci telekomunikacyjnych (jak również zarządzania i sterowania nimi). W szczególności stwierdzam, że:

- Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.
- Przedmiotem rozprawy doktorskiej p. Bartłomieja Ostrowskiego jest oryginalne rozwiązanie istotnego problemu naukowego (a nawet szeregu związanych ze sobą problemów).

#### **11. OCENA ROZPRAWY. Do której kategorii zalicza się rozprawa?**

Uważam, że przedstawiona rozprawa – ze względu na trudną tematykę, którą Doktorant bardzo trafnie opracował, oraz z uwagi na wszechstronne podejście optymalizacyjne – jest wybitnie dobra i zasługuje na wyróżnienie, o co wnioskuję. Pomijając wysoki poziom przedstawionych badań naukowych praca jest poparta kilkoma wysokiej jakości publikacjami.



Piotr Cholda