

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY  
INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

zaprasza na  
PUBLICZNĄ OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ  
**mgr. inż. Ilya Kalesnikau**

która odbędzie się w dniu **7 września 2022 roku o godzinie 11.00** w trybie stacjonarnym  
(gmach Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych; sala 476-479; IV piętro sektor A)

Temat rozprawy doktorskiej:

*„Optimization of communication networks with variable capacity of links”*

Promotor: dr hab. inż. Artur Tomaszewski – Politechnika Warszawska

Recenzenci: dr hab. inż. Piotr Chołda – Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

prof. dr hab. inż. Krzysztof Walkowiak – Politechnika Wrocławska

Osoby zainteresowane uczestnictwem w obronie proszone są o zgłoszenie chęci uczestnictwa w formie elektronicznej na adres sekretarza komisji:

dr hab. inż. Mariusz Rawski, prof. uczelni – email : [mariusz.rawski@pw.edu.pl](mailto:mariusz.rawski@pw.edu.pl) do dnia 2 września 2022 do godz. 12:00.

Z rozprawą doktorską i recenzjami można zapoznać się w Czytelni Biblioteki Głównej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Plac Politechniki 1.

Streszczenie rozprawy doktorskiej i recenzje są zamieszczone na stronie internetowej: <https://bip.pw.edu.pl/Postepowania-w-sprawie-nadania-stopnia-naukowego/Doktoraty/Wszczete-do-30-kwietnia-2019-r/Dyscyplina-informatyka-techniczna-i-telekomunikacja-dziedzina-nauk-inzynieryjno-technicznych/mgr-inz-Ilya-Kalesnikau>.

Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny  
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja  
Politechniki Warszawskiej  
**dr hab. inż. Jarosław Arabas**

Ilya Kalesnikau  
i.kalesnikau@tele.pw.edu.pl  
Politechnika Warszawska  
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych  
Instytut Telekomunikacji

Warszawa, 04.04.2022 r.

## **Streszczenie**

### **Optymalizacja sieci telekomunikacyjnych ze zmienną przepustowością łączy**

Logical Tunnel Capacity Control jest strategią kierowania i zabezpieczania ruchu przeznaczoną dla sieci teleinformatycznych charakteryzujących się częstymi zmianami przepustowości łączy. Kluczowym elementem strategii LTCC jest oryginalny mechanizm Flow Thinning pocieniania przepływów sterujący wielkością strumienia ruchu w odpowiedzi na zmieniający się stan łączy.

Rozprawa przedstawia modele problemów programowania liniowego całkowitoliczbowego i algorytmy optymalizacyjne służące do projektowania sieci wykorzystujących strategię LTCC oraz analizuje ich skuteczność i wydajność. Stanowi wszechstronne studium modeli i rozwiązań problemu projektowania odpowiadających zdefiniowanym wariantom mechanizmu FT oraz wariantom sposobu opisu stanów dostępności łączy. Aby zapewnić efektywność obliczeniową proponowanych metod projektowania sieci, rozważane modele i algorytmy wykorzystują podejście oparte na generacji ścieżek i na generacji stanów. Rozprawa szczegółowo analizuje wynikającą z takiego podejścia dekompozycję problemu projektowania oraz szczegółowe sformułowania podproblemów, odpowiadające poszczególnym wariantom mechanizmu FT. Szerokie badania efektywności i wydajności uzyskanych sformułowań przy użyciu rzeczywistych danych o ruchu i sieci, pozwalają ocenić zarówno wydajność proponowanych modeli i algorytmów, jak również uzyskiwanych rozwiązań sieciowych.

Przedstawione wyniki dowodzą, że strategia LTCC jest efektywnym rozwiązaniem kierowania i zabezpieczania ruchu sieciowego, a warianty problemu projektowania sieci związane z poszczególnymi odmianami mechanizmu FT można skutecznie modelować i rozwiązywać korzystając z jednolitego szkieletu pojęciowego. Rozprawa udowadnia, że dzięki różnorodności wariantów mechanizmu FT strategia LTCC jest elastycznym podejściem do problemu projektowania i zarządzania sieciami teleinformatycznymi ze zmienną przepustowością łączy, dając możliwość poszukiwania kompromisu pomiędzy odpornością kierowania, kosztem sieci, łatwością wdrożenia i czasem optymalizacji.

Wrocław, 31 maja 2021

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Walkowiak  
Wydział Informatyki i Telekomunikacji  
Politechnika Wrocławska

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ  
DLA RADY DYSCYPLINY INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA  
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

**Autor rozprawy doktorskiej:** mgr inż. Ilya Kalesnikau

**Tytuł rozprawy doktorskiej:** „*Optimization of communication networks with variable capacity of links*”

**Promotor:** dr hab. inż. Artur Tomaszewski, prof. uczelni.

**1. Zakres i charakter rozprawy**

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Ilya Kalesnikau dotyczy zagadnień związanych z sieciami teleinformatycznymi, w szczególności zagadnień dotyczących optymalizacji sieci stosujących strategię LTCC (ang. *Logical Tunnel Capacity Control*). LTCC jest metodą przesyłania danych w sieciach teleinformatycznych charakteryzujących się częstymi zmianami przepustowości łączy. Strategia LTCC wykorzystuje oryginalny mechanizm pocieniania przepływów FT (ang. *Flow Thinning*), który kontroluje przepustowość przepływów w sieci w odpowiedzi na zmieniającą się przepustowość łączy. Ponieważ istnieje wiele różnych możliwych scenariuszy dotyczących zmieniających się przepustowości łączy, stosowane jest pojęcie stanu sieci (ang. *state*), umożliwiające zamodelowanie różnych stanów poprzez określenie wektora współczynników dostępności łączy (ang. *link availability*). Współczynnik dostępności łącza wyraża jaki procent przepustowości łącza jest dostępny w danym stanie sieci. Rozważany scenariusz działania sieci teleinformatycznej dotyczący zmieniającej się przepustowości łączy odnosi się do sieci bezprzewodowych o architekturze kratowej WMN (ang. *Wireless Mesh Networks*) stosujących technikę FSO (ang. *Free Space Optics*) oraz transmisję połączeniową wykorzystującą protokół MPLS (ang. *Multiprotocol Label Switching*). W sieci WMN – w związku ze zmieniającymi się warunkami propagacji sygnału radiowego (np. z powodu zmian warunków pogodowych) – może nastąpić czasowe obniżenie dostępnej przepustowości w niektórych łączach sieci. W efekcie może nastąpić zjawisko blokady prowadzące do braku możliwości realizacji części przepływów w sieci. Jedną z możliwości przeciwdziałania temu niekorzystnemu zjawisku jest technika pocieniania przepływów FT, w której przepływy realizowane w sieci mają zmniejszoną przepustowość adekwatnie do degradacji łączy wskutek pogarszających się warunków w sieci. Innym rozwiązaniem stosowanym w celu ochrony sieci może być metoda UR (ang. *Unrestricted Reconfiguration*), w której dla danego stanu sieci wszystkie przepływy są na nowo zestawiane w



sieci, co jednak jest trudne w realizacji od strony zarządzania siecią. Główną zaletą metody FT rozważanej w rozprawie jest łatwiejsza realizacja tej metody w sieci, co wynika bezpośrednio z faktu, że w metodzie FT o wiele mniejsza liczba przepływów jest modyfikowana w porównaniu do metody UR w przypadku zmniejszenia przepustowości łączy.

Należy podkreślić, że przedstawione modele i algorytmy mają charakter ogólny i mogą być zastosowane także dla innych sieci teleinformatycznych charakteryzujących się zmiennością dostępnej przepustowości. Wybrana tematyka rozprawy jest aktualnym obszarem badań poszerzających dotychczas realizowane badania w zakresie optymalizacji sieci teleinformatycznych.

Rozprawa doktorska ma charakter zarówno poznawczy jak i użyteczny. W zakresie rozważań teoretycznych, mgr inż. Ilya Kalesnikau opracował modele matematyczne oraz algorytmy optymalizacyjne wykorzystujące zaawansowane techniki matematyczne związane z programowaniem liniowym. Natomiast aspekt użyteczny rozprawy doktorskiej jest związany z implementacją zaproponowanych algorytmów w środowisku symulacyjnym oraz przeprowadzeniem obszernych badań eksperymentalnych pokazujących jakość działania zaproponowanych metod oraz właściwości stosowania różnych wersji mechanizmu FT na tle rozwiązania referencyjnego UR (ang. *Unrestricted Reconfiguration*) dla różnych scenariuszy degradacji sieci w zakresie liczby zdegradowanych łączy.

## 2. Zawartość rozprawy

Rozprawa składa się z 5 rozdziałów. Pierwszy rozdział to wprowadzenie przedstawiające motywację tematu rozprawy, opis podstawowych zagadnień związanych z tematyką rozprawy doktorskiej, przegląd literaturowy dotyczący obszarów badawczych poruszanych w rozprawie oraz tezę doktoratu. Rozdział 2 zawiera opis oraz matematyczne sformułowanie rozważanych w rozprawie problemów optymalizacyjnych. W rozdziale 3 Doktorant przedstawił algorytmy opracowane do rozwiązania zagadnień badawczych wprowadzonych w poprzednim rozdziale. Rozdział 4 zawiera prezentację badań symulacyjnych, w tym omówienia i dyskusję uzyskanych wyników. Ostatni rozdział zawiera podsumowanie rozprawy. W mojej ocenie struktura rozprawy doktorskiej jest prawidłowa. Doktorant w logiczny i przejrzysty sposób przedstawił kolejne zagadnienia, co ułatwia lekturę i analizę zawartości rozprawy. Ponadto, pragnę podkreślić wysoką jakość rozprawy pod kątem językowym, stylistycznym i edycyjnym.

## 3. Poprawność i oryginalność postawionej tezy

Rozprawa nie zawiera precyzyjnego zdefiniowania tezy badawczej (ang. *research question*). Określony jest jedynie główny cel pracy sformułowany w następujący sposób: „*The aim of this thesis is to develop efficient methods of network design, evaluate their computational performance, and examine the effectiveness of the LTCC strategy.*”

W mojej opinii cel rozprawy jest sformułowany w poprawny sposób. Mgr inż. Ilya Kalesnikau na podstawie przeglądu literaturowego i własnej wiedzy prawidłowo określił zakres rozprawy



doktorskiej, koncentrując się na aktualnych i ważnych zagadnieniach związanych ze współczesnymi sieci teleinformatycznymi.

Cel rozprawy został osiągnięty w rozprawie doktorskiej poprzez:

- Sformułowanie modeli matematycznych dotyczących rozwiązywania w rozprawie problemów optymalizacji sieci wykorzystujących strategię LTCC.
- Opracowanie algorytmów optymalizacyjnych umożliwiających rozwiązanie problemów optymalizacji sieci wykorzystujących strategię LTCC.
- Implementację opracowanych algorytmów w środowisku IBM CPLEX Optimizer.
- Przeprowadzenie obszernych eksperymentów symulacyjnych i analizę uzyskanych wyników.

Według mojej opinii mgr inż. Ilya Kalesnikau rozwiązał postawiony problem naukowy stosując prawidłowe metody badawcze.

#### **4. Analiza źródeł (w tym literatury światowej i stanu techniki) świadcząca o dostatecznej wiedzy autora w danej dyscyplinie naukowej**

Rozprawa doktorska mgr inż. Ilya Kalesnikau dotyczy aktualnych zagadnień związanych z optymalizacją sieci teleinformatycznych. Doktorant przeprowadził dokładny przegląd literaturowy. Lista pozycji bibliograficznych umieszczona w rozprawie zawiera 79 publikacji naukowych. Wśród nich znajdują się najważniejsze prace związane z tematyką kratowych sieci radiowych WMN, metodami optymalizacji sieci teleinformatycznych, zagadnieniami projektowania sieci odpornych na awarie. Przedstawiony przegląd literaturowy stanowi dobre wprowadzenie do dalszej części rozprawy prezentującej oryginalne koncepcje Doktoranta. Moim zdaniem, Doktorant posiada odpowiednią wiedzę i znajomość współczesnej literatury z zakresu związanego z tematyką rozprawy.

#### **5. Pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i stanu techniki reprezentowanych przez literaturę światową**

Tematyka rozprawy doktorskiej jest związana z aktualnie rozwijanymi kierunkami badań w zakresie sieci teleinformatycznych. Zagadnienia dotyczące usprawnienia działania sieci teleinformatycznych w zakresie zapewniania jakości usług QoS (ang. *Quality of Service*) oraz minimalizacji kosztów budowy sieci uwzględniające charakterystyczne cechy stosowanych technologii i protokołów są ważnym tematem badawczym. Wynika to z dużej konkurencji na rynku usług sieciowych oraz z nieustannej potrzeby biznesowej dotyczącej optymalizacji kosztów budowy i użytkowania sieci teleinformatycznych. Kratowe sieci bezprzewodowe WMN są atrakcyjną alternatywą dla dotychczas stosowanych rozwiązań.

W rozprawie poruszane są aktualne zagadnienia z obszarów telekomunikacji i informatyki, w tym dotyczące kratowych sieci bezprzewodowych oraz zastosowania zaawansowanych metod optymalizacji sieci teleinformatycznych. Problem rozwiązywany w rozprawie jest znany od wielu lat, jednak dotychczas stosowana metoda UR jest trudna w użyciu ze względu na duży nakład związany z

zarządzaniem siecią w sytuacji zmieniających się przepustowości łączy. Zastosowana w rozprawie metoda FT jest łatwiejsza do wdrożenia w sieciach ze względu na mniejszą nakład związany z zarządzaniem siecią.

Rozważane problemy optymalizacyjne stosujące technikę LTCC zostały sformułowane w postaci modeli matematycznych. Charakterystyka tych modeli, w szczególności wysoka złożoność związana z wykładniczo rosnącą liczbą ścieżek kandydujących oraz stanów sieci, wymagała zastosowania specjalnych technik optymalizacyjnych, gdyż tradycyjne techniki nie dają możliwości rozwiązania rozważanych problemów nawet dla średniej wielkości sieci. W efekcie, co zasługuje na szczególne podkreślenie, Doktorant do rozwiązania sformułowanych problemów optymalizacyjnych zastosował zaawansowane i nowoczesne techniki optymalizacyjne z zakresu metod programowania liniowego bazujące na zasadzie dualności oraz technikach typu generacji kolumn (ang. *column generation*). Wymagało to bardzo dużej wiedzy i doświadczenia Doktoranta w zakresie użycia technik programowania liniowego, w szczególności w zakresie dekompozycji rozważanych problemów optymalizacyjnych i stosowania teorii dualności. Ponadto, należy podkreślić, że zrealizowane badania symulacyjne zawierają racjonalne założenia i wykorzystują realne scenariusze badawcze, w tym scenariusz dotyczący obszaru metropolitalnego Paryża uwzględniający dane populacyjne oraz dane meteorologiczne wykorzystane do oszacowania degradacji łączy.

## 6. Znaczenie uzyskanych wyników dla danej dyscypliny naukowej

Jako najważniejsze oryginalne osiągnięcia rozprawy doktorskiej mgr inż. Ilya Kalesnikau w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja należy wymienić:

- Sformułowanie problemu badawczego dotyczącego optymalizacji przepływów sieci z zastosowaniem techniki LTCC w sieciach teleinformatycznych charakteryzujących się częstymi zmianami przepustowości.
- Przedstawienie przypadku użycia rozważanego scenariusza w postaci bezprzewodowej sieci kratowej WMN stosującej technikę FSO oraz protokół MPLS.
- Opracowanie modeli matematycznych dotyczących rozważanego problemu badawczego wykorzystujących programowanie liniowe i teorię przepływów wieloskładnikowych. W zakresie mechanizmu pocieniania przepływów FT rozważono szereg różnych wariantów formuły definiującej wzór do obliczenia nowego (zmniejszonego) przepływu w przypadku degradacji łączy.
- Opracowanie algorytmów rozwiązujących opracowane modele matematyczne wykorzystujących metody programowania liniowego bazujące na teorii dualności oraz technikach typu generacji kolumn.
- Implementacja opracowanych algorytmów środowisku IBM CPLEX Optimizer.
- Opracowanie scenariuszy badań z uwzględnieniem różnych wersji mechanizmu pocieniania przepływów FT oraz różnej liczby zdegradowanych łączy. W badaniach m.in. wykorzystano realne dane dotyczące obszaru metropolitalnego Paryża w zakresie generowanego ruchu



proporcjonalnego do liczby mieszkańców oraz dane meteorologiczne wykorzystane do określenia stopnia degradacji łączy.

- Dokładna analiza uzyskanych wyników pod kątem efektywności poszczególnych algorytmów

Należy podkreślić, że opracowane koncepcje oraz uzyskane wyniki mają duże znaczenia praktyczne. Doktorant zdefiniował i następnie rozwiązał realny i aktualny problem badawczy związany z sieciami teleinformatycznymi charakteryzującymi się zmieniającymi się przepustowościami łączy.

## **7. Główne wady rozprawy, słabe stron wraz z krytycznymi uwagami szczegółowymi**

### **Uwagi natury ogólnej:**

- Brak przedstawienia tezy rozprawy (pytania badawczego), Doktorant nie sformułował głównej tezy rozprawy, sformułowany został jedynie główny cel rozprawy bez podania celów szczegółowych.
- Przedstawiony przegląd literatury jest dość skromny.
- Zakres badań symulacyjnych przedstawiony w rozprawie jest stosunkowo niewielki. Dla dokładniejszej analizy skalowalności proponowanych metod oraz próby generalizacji (uogólnienia) otrzymanych wyników, warto byłoby przeprowadzić badania dla większej liczby topologii oraz rozważanych scenariuszy ruchu oraz degradacji łączy.
- Brak szerszej dyskusji dotyczącej skalowalności zaproponowanych metod dla większych topologii sieciowych.
- Popularną metodą rozwiązywania skomplikowanych problemów optymalizacji w sieciach teleinformatycznych są algorytmy heurystyczne, w szczególności algorytmy metaheurystyczne oferujące dobry kompromis między jakości otrzymanych wyników i czasem obliczeń. W rozprawie nie przedstawiono wyników porównujących zaproponowane metody z wynikami innych algorytmów heurystycznych, np. metod konstrukcyjnych lub metod metaheurystycznych.

### **Uwagi natury polemicznej:**

- W rozprawie rozważane są wyłącznie przepływy typu unicast, nie przedstawiono możliwości zastosowania opracowanych algorytmów do problemów optymalizacji sieci uwzględniających przepływy multicast oraz anycast.

### **Uwagi szczegółowe:**

- W spisie oznaczeń umieszczono tylko podstawowe oznaczenie, wiele innych oznaczeń nie zostało umieszczonych, co w pewnym stopniu utrudnia lekturę rozprawy.
- W niektórych przypadkach stosowane we wzorach oznaczenia nie są wprowadzone, co utrudnia analizę tych wzorów. Np. oznaczenie  $U^k$  użyte w wzorze (2.9) jest zdefiniowane kilka akapitów później. Podobnie oznaczenie  $N(k)$ .



- Wzory (2.12a) oraz (2.12b) nie są zdefiniowane w precyzyjny sposób, tzn. nie jest jasne co jest indeksem sumowania.

## 8. Konkluzja

Recenzowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie jednoznacznie sformułowanego zagadnienia naukowego. Mgr inż. Ilya Kalesnikau wykazał w tej rozprawie w przekonujący sposób umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych, a także ich prawidłowej i wnikliwej interpretacji. Wymienione powyżej uwagi ogólne, polemiczne oraz szczegółowe nie mają znaczącego wpływu na pozytywną ocenę rozprawy. W związku z powyższym uważam, iż przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Ilya Kalesnikau spełnia wymogi zawarte w Ustawie dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r, nr 1669) oraz w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 roku (Dz. U. z 2003 r., nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

*W. Koc...*

## Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji

## INSTYTUT TELEKOMUNIKACJI

Dr hab. inż. Piotr CHOŁDA

Kraków, dn. 23 maja 2022 r.

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ****Tytuł rozprawy: *Optimization of communication networks  
with variable capacity of links*****Autor rozprawy: mgr inż. Ilya Kalesnikau****1. WSTĘP**

Niniejszą recenzję sporządzam w ramach postępowania o nadanie stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych. Postępowanie prowadzi Rada Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej (PW). Drukowaną wersję dokumentacji dot. rozprawy doktorskiej, wraz z informacją o powołaniu przez Radę Dyscypliny na recenzenta rozprawy, otrzymałem od Przewodniczącego RD, p. prof. dr. hab. inż. Jarosława ARABASA, prof. PW) w dn. 18 maja 2022 r. Wcześniej uzyskałem jednak wersję elektroniczną rozprawy (po powołaniu przez RD na recenzenta), co pomogło mi szybko sporządzić niniejszą recenzję.

Recenzowana rozprawa została złożona przez p. mgr. inż. Ilyę KALESNIKAU. Jej tytuł to: „Optimization of communication networks with variable capacity of links”. Promotorem doktoratu jest p. dr hab. inż. Artur TOMASZEWSKI, prof. PW. Dostarczona mi w wersji elektronicznej rozprawa doktorska została w całości (poza jednostronicowym streszczeniem) napisana w języku angielskim. Rozprawa liczy 73 numerowane strony, które poprzedza strona tytułowa, anglojęzyczne podziękowania *Acknowledgement*, streszczenie *Abstract* (str. v), wspomniane polskie Streszczenie (str. vii), spis treści *Contents* (str. ix-x), spis rysunków *List of Figures* i spis tablic *List of Tables* (str. xi), spis sformułowań matematycznych i algorytmów *List of Formulations and Algorithms* (str. xii), spis skrótów *List of Abbreviations* (str. xii-xiv), spis użytych oznaczeń matematycznych *List of Symbols* (str. xv-xvi). Praca doktorska w zasadniczej swojej części składa się z pięciu numerowanych rozdziałów, w których (poza początkowym i końcowym) zawarto oryginalne wyniki zebrane jako uzysk naukowy Doktoranta: 1. *Introduction* (str. 1-9), 2. *Optimization problems* (str. 10-21), 3. *Solution algorithms* (str. 22-43), 4. *Numerical study* (str. 44-61), 5. *Summary* (str. 62-64). Pracę doktorską na końcu uzupełniają: skorowidz używanych terminów *Index* (str. 65) oraz ułożona w kolejności alfabetycznej wykorzystana literatura przedmiotu *Bibliography* (str. 66-73).

Recenzja została sporządzona w oparciu o obowiązujące Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce. Poniżej odnoszę się do różnych elementów oceny rozprawy

**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)



doktorskiej, którymi zwyczajowo się posługuje (na podstawie formularza opracowanego kiedyś w Politechnice Warszawskiej).

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

Problematyka doktoratu dotyczy zagadnień zarządzania sieciami telekomunikacyjnymi, jak również sterowania nimi. Główne zagadnienie polega na określaniu poziomu przydziału zasobów transmisyjnych w przypadku, gdy w trakcie działania sieci dochodzi do degradacji jakości, tutaj polegającej na zmniejszaniu się ilości dostępnych zasobów w stosunku do tzw. sytuacji nominalnej/normalnej, dla której zaplanowano optymalne działanie sieci na etapie optymalizacji. W przypadku omawianego zagadnienia może dochodzić do uszczuplania zasobów przeznaczonych na transmisję danych w ramach poszczególnych przepływów (stąd angielska nazwa *flow thinning*, którą tutaj nie zawsze konsekwentnie tłumaczę jako zmniejszanie lub pomniejszanie zasobów itp.). Nietrywialnym zagadnieniem jest zapewnienie kontrolowanego poziomu takiego uszczuplenia, przy czym kontekst techniczny dla takiej sytuacji to albo problemy niezawodnościowe (uszkodzenia) albo pogarszanie się jakości działania poszczególnych elementów sieci (w rozprawie używa się w zasadzie języka związanego z niezawodnością, np. *restoration* czy *protection*, ale nie ma to większego znaczenia i zaletą podejścia jest jego uniwersalny charakter). Doktorant skupia się na analizie elementów łączowych, ale wiadomo, że stosowany opis obejmuje w zasadzie także możliwość uwzględnienia problemów z wierzchołkami sieci. Pogarszanie się jakości jest opisywane jako zmniejszenie się możliwości transmisyjnych (tj. obniżenie poziomu dostępnej przepływności bitowej), co jest modelowane z użyciem parametru stopnia gotowości  $\alpha$  oraz wielkości do niego komplementarnej  $\beta$ . Celem podejścia optymalizacyjnego jest utrzymanie odpowiedniego poziomu obsługi, tj. zapewnienie, że w razie wystąpienia problemu poziom przepływności zapewnianej odpowiednim zapotrzebowaniom nie spadnie poniżej wcześniej zdefiniowanych oczekiwań. Zagadnienie jest istotne z punktu widzenia praktycznego, gdyż wszystkie architektury sieciowe na pewno są narażone na uszkodzenia (czy ataki), a z kolei degradacja jakości łączy to stałą trudność z użyciem wszystkich technik transmisji bezprzewodowych (czy to radiowych czy innych, np. optycznych).

W pracy nie sformułowano tezy, ale jasno powiedziano, co jest uzyskiem naukowym (wkład pracy wprowadzono głównie w podrozdziałach 1.3 *Problem description* oraz 1.5 *Thesis contribution*) i wydaje mi się to trafnym podejściem, na pewno nie zaburzającym jasności zdefiniowania przedmiotu prac. Doktorant wprowadza zagadnienie od strony optymalizacyjnej, tj. modeluje zadania optymalizacji, które opisują podany problem techniczny (rozdział 2), a następnie – ze względu na to, że jest to zadanie o charakterze niezwartym (z punktu widzenia zarówno możliwych do użycia ścieżek dopuszczalnych, jak również scenariuszy związanych z pogorszeniem jakości) wprowadza metody uzyskiwania rozwiązania optymalnego z zastosowaniem generacji kolumn (dodawanie kolejnych ścieżek dopuszczalnych) oraz generacji wierszy (dodawanie kolejnych scenariuszy) – w rozdziale 3. Następnie w celu wykazania, że zarówno wprowadzone zadania optymalizacji pozwalają na uzyskiwanie atrakcyjnych wyników związanych z użyciem zasobów, jak również że zdefiniowane metody uzyskiwania wyników



optymalnych są efektywne (co wcale nie musi przecież być oczywiste) ilustruje działanie zaproponowanych koncepcji w rozdziale 4.

Główna część pracy ma charakter teoretyczny, mimo że badania są indukowane zagadnieniami praktycznymi, które Doktorant ogólnie opisuje. Przede wszystkim jednak najważniejsze rozdziały (tj. 2 i 3) dotyczą z jednej strony sformułowania szeregu nietrywialnych zadań optymalizacji opisujących problem, a z drugiej strony wnikliwych i wysoce oryginalnych metod rozwiązywania tych zadań. Doktorant opiera się przede wszystkim na programowaniu liniowym (głównie ze zmiennymi ciągłymi, chociaż niektóre zagadnienia wymagają użycia zmiennych zero-jedynkowych), ale co najmniej w jednym przypadku konieczne jest użycie programowania kwadratowego. Z punktu widzenia stosowanych metod optymalizacji, tj. rozwiązywania sformułowanych zadań, nietrywialne oraz istotne znaczenie ma użycie teorii dualizacji, która służy wprowadzeniu zadań pomocniczych.

**3. 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?**

Bibliografia, na której oparł się Doktorant, liczy 79 pozycji, z których zresztą część jest jego współautorstwa, a część powstała w grupie badaczy, z którą Doktorant współpracował (tutaj należy zwrócić przede wszystkim uwagę na prace p. prof. Michała PIÓRO). Doktorant nie zdecydował się poświęcić analizie literaturowej odrębnego rozdziału, co byłoby cenne. Wyróżnił wprawdzie niewielkie podrozdziały, które mają charakter analizy literaturowej, ale o ile wymieniane w nich pozycje na pewno są warte uwzględnienia w pracy, nie można powiedzieć żeby wyczerpująco przedstawiono stan wiedzy z danej dziedziny. Nie mam wprawdzie wątpliwości, że Doktorant zna się na dziedzinie (czego zresztą dowodzi dalsza część pracy), ale jednak w rozprawach doktorskich praktykuje się wyraźniejsze wskazanie, jakiego typu elementy wiedzy są używane, jakie są oryginalnie rozwinięte, gdzie pojawiły się konkretne koncepcje, jak to się ma do obecnych prac innych badaczy itd. Ten aspekt Doktorant zrealizował w stopniu akceptowalnym, chociaż minimalnym. Analiza literaturowa mieści się w kilkustronicowym podrozdziale 1.3 (który przede wszystkim jest skupiony na wprowadzeniu oryginalnego dorobku raportowanego przez rozprawę) oraz podrozdziale 1.4, który wprost nosi tytuł *Related work*, ale którego długość nie przekracza nawet półtorej strony. W związku z tym analiza literaturowa jest bardzo skrótowa i w zasadzie nie ma charakteru w pełni systematycznego. Przyznaję jednak, że Doktorant trafnie przytacza różne konteksty, które są związane z zagadnieniami optymalizacyjnymi, a które wiążą się z jego badaniami. Nie pomija też najbardziej adekwatnych pozycji literaturowych odnoszących się do tego kontekstu. Niedużo mówi o możliwościach technicznej realizacji podejścia, którym się zajmuje. Niekiedy także odbiega od problematyki, opisując zagadnienia, które w ogólny sposób wprawdzie łączą się z jego badaniami, ale w zasadzie dotyczą nieco innych spraw (np. zagadnienia SRLG w projektowaniu sieci niezawodnych). Analiza literaturowa nie służy Doktorantowi w pełni do wytłumaczenia, dlaczego skupia się na niektórych zagadnieniach, a pomija inne –



bardzo podobne (jak na przykład wspomniane przez niego problemy trasowania elastycznego).

Mimo wskazanych zastrzeżeń stwierdzam, że Doktorant osadził pracę przede wszystkim w kontekście optymalizacyjnym (tj. jako inspirowaną różnymi koncepcjami z zakresu szeroko pojętych badań operacyjnych) jak również w kontekście projektowania sieci telekomunikacyjnych, co bez wątpienia stanowi kluczowe tło dla jego badań. Na pewno prace opisujące głównie zagadnienie związane ze zmniejszaniem przepływów są reprezentowane w pełni i tutaj opis literaturowy jest wyczerpujący.

#### **4. 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?**

Z punktu widzenia umiejscowienia problematyki w ramach telekomunikacji doktorat dotyczy obszaru zarządzania/sterowania przepływnością połączeń wirtualnych w sieciach (Doktorant używa określenia LTCC, tj. *logical tunel capacity control*). W odniesieniu do różnych niekorzystnych efektów występujących w sieci prace skupiają się na słusznym założeniu, że trzeba wziąć pod uwagę zróżnicowaną dostępność przepływności w zależności od konkretnych scenariuszy (które opisują uszkodzenia lub inne sytuacje degradacji jakości). W celu sformułowania zagadnienia od strony technicznej, jak również wprowadzenia zadań optymalizacji, Doktorant posługuje się paradygmatem połączeniowym (tj. zakłada, że między parami wierzchołków sieci występują zapotrzebowania typu unicastowego, które mają swoją wielkość nominalną, którą należy zrealizować w sytuacji gdy nie występują problemy; jak również mają określony poziom wymaganej przepływności zmniejszony w przypadku ich wystąpienia). Poza przyjęciem takiego zasadnego podejścia, Doktorant realistycznie zakłada, że w przypadku wystąpienia problemu nie będzie możliwe nieograniczone użycie całej dostępnej w sieci przepływności, tylko że przepływy mogą co najwyżej korzystać z zasobów w taki sposób, w jaki miało to miejsce przed wystąpieniem problemu. Zatem Doktorant skupia się na takiej optymalizacji zasobów (funkcja celu jest oparta na minimalizacji kosztów użycia przepływności na łączach modelowanej proporcjonalnie do wielkości ruchu), żeby przepływy pomniejszone (ale nie przeorganizowane) dalej zapewniały odpowiedni poziom jakości. Degradację jakości zdefiniowano jako odsetek przepływności, która może być zrealizowana w odróżnieniu od sytuacji nominalnej, gdy jest dostępna pełna przepływność. Prowadzi to typowo do obniżenia możliwości transmisyjnych, przy czym w połączeniu z założeniem Doktoranta, że przepływność wymagana przez zapotrzebowanie nie może wzrosnąć w stosunku do sytuacji nominalnej, wymaga właśnie obniżenia przepływności (co po angielsku nosi określenie *flow thinning*). Jest to scenariusz, który realistycznie zakłada, że nie da się w przypadku degradacji jakości użyć przepływności, która zostanie „uwolniona” przez przepływy, które i tak nie mogłyby być realizowane (co jest realistyczne, gdyż wymagałoby być może bardzo kłopotliwego przeorganizowania ruchu w całej sieci – przedstawiono jednak w celu czysto porównawczym takie sformułowanie, tzw. rekonfigurację bez ograniczeń, *unrestricted reconfiguration*). Doktorant pomija jednak (ale świadomie) opcję, że na tych samych przepływach dałoby się po prostu zwiększyć ruch. Być może byłby to scenariusz zasadny z punktu widzenia obsługi ruchu typu *best effort*. Rezygnacja z niego nie obniża jednak w żadnym stopniu



użyteczności wyników i jest zrozumiała ze względu na przyjęte założenia (bez wątplenia w przeciwnym przypadku nie można byłoby przecież mówić o pomniejszaniu przepływności, *thinning*).

W celu uporania się z przedstawionym zagadnieniem Doktorant formułuje szereg zadań optymalizacji w rozdziale 2, następnie przedstawia sposób ich rozwiązania w rozdziale 3, a na koniec – w rozdziale 4 – pokazuje przykłady liczbowe uzasadniające efektywność wprowadzonych metod rozwiązywania oraz pewną liczbę fenomenów związanych z rozwiązaniami optymalnymi sformułowanych zadań w konkretnych scenariuszach sieciowych. I tak w rozdziale 2 Doktorant przedstawia zadania optymalizacji, którymi się posługuje. Zadania opierają się na tradycyjnie przyjętym modelu przepływów wielotowarowych, w ramach którego dla poszczególnych zapotrzebowań unikastowych określa się nominalną wielkość ruchu do przeniesienia (wolumen ruchu), który może być zrealizowany z użyciem szeregu ścieżek dopuszczalnych zdefiniowanych odrębnie dla każdego z nich. Doktorant dopuszcza bifurkację przepływów, tj. fakt realizacji zapotrzebowań z użyciem wielu podprzepływów na różnych ścieżkach. Założenie jest bardzo przydatne, bo po pierwsze nie wymusza kłopotliwego modelowania z użyciem zmiennych zero-jedynkowych, co zaciemniałoby sformułowania i nie jest przedmiotem rozprawy. A po drugie realistycznie umożliwia zmniejszanie przepływności na potrzeby zapotrzebowania bez konieczności ich przeorganizowywania (co byłoby zapewne niedopuszczalne z punktu widzenia administracyjnego). Doktorant słusznie zakłada, że sterowanie ruchem, w tym zmiana wielkości przepływności bitowej na potrzeby poszczególnych zapotrzebowań, odbywa się w oparciu o połączenia wirtualne (np. tunele, jak w przypadku MPLS), zaś modyfikacje dokonują się niekoniecznie w oparciu o wiedzę globalną nt. zmienności jakości działania sieci (tj. tytułowej zmienności przepływności łączy, ang. *variable capacity of links*), ale także w oparciu o wiedzę lokalną. Prowadzi to do użycia różnego typu podejść w ramach optymalizacji. Jest to bardzo cenne spojrzenie na zagadnienie, gdyż faktycznie uzyskanie zbieżnego obrazu sieci w sensie globalnym może trwać długo i prowadzić do niekorzystnych efektów, co jest ważnym aspektem z punktu widzenia zapewniania jakości w kontekście niezawodnościowym.

Doktorant musi być w stanie panować nad poszczególnymi przepływami. Z tego względu formułuje zadania z użyciem podejścia typu łączy-ścieżka, za co płaci niezwartością sformułowania (oczywiście nie może uwzględnić wszystkich możliwych ścieżek, gdyż wymagałoby to rozszerzenia sformułowania do wielkości wykładniczej). Przyjęcie podejścia węzeł-łączy, przy założeniu że ruch na łączy musi być ograniczony przez ruch w sytuacji nominalnej, wiązałoby się również z innymi kłopotami. W celu poradzenia sobie z niezwartością z punktu widzenia ścieżkowego Doktorant wprowadza w rozdziale 3 podejście oparte na dualizacji, tj. generację kolumn, która w sposób efektywny umożliwia dodawanie dla poszczególnych zapotrzebowań nowych ścieżek dopuszczalnych. Autor bierze też pod uwagę różne scenariusze pogorszenia jakości. To też prowadzi go do drugiego powodu niezwartości przedstawionych sformułowań, gdyż oczywiście nie może uwzględniać wszystkich możliwych kombinacji degradacji różnych łączy (byłoby ich teoretycznie nieskończenie wiele, bo przecież degradacja ma charakter ciągły), ale nawet gdyby ograniczył się tylko do kilku poziomów degradacji dla każdego łącza to skombinowanie wszystkich możliwości prowadziłoby do wykładniczej liczby scenariuszy. W tym przypadku Doktorant generuje dodatkowe scenariusze z użyciem koncepcji generacji wierszy.



W ogólności podejście optymalizacyjne zależy od trzech czynników związanych z uwzględnieniem różnego rodzaju informacji sterujących: sposobu organizacji pomniejszania przepływu (ang. *form*): w wersji tzw. afinicznej oraz kwadratowej, które w różny sposób traktują zagadnienie sposobu ustalania zmniejszonej przepływności; struktury określającej zmianę przepływu (ang. *structure*): w wersji ogólnej i uproszczonej, które określają do jakiego rodzaju przepływu nominalnego jest odnoszone pomniejszenie; zakresu degradacji łączy branego pod uwagę w przypadku zmniejszania przepływu (ang. *range*). Uwzględnienie kombinacji wszystkich tych opcji daje w ogólności 12 różnych sformułowań ogólnych zadań optymalizacji, które po pierwsze w co najmniej niektórych przypadkach oznaczają inny sposób radzenia sobie z trudnościami przy rozwiązywaniu zadań, a po drugie – w odmienny sposób służą opisowi sytuacji z punktu widzenia możliwego sterowania pomniejszaniem ruchu. Pierwsze zagadnienie jest bardzo ciekawe z teoretycznego punktu widzenia, za to drugie jest bardzo istotne z punktu widzenia możliwości praktycznego wdrożenia rozwiązań opisywanych przez Doktoranta. Doceniam zwrócenie przez Doktoranta uwagi także na ten drugi aspekt, bo to zwiększa szanse na wdrożenie wyników rozprawy, która zasadniczo ma przecież charakter teoretyczny.

Tutaj muszę niestety zaznaczyć, że sposób postawienia problemu (nie tylko w rozdziale 2, ale też we wstępie do zagadnienia w rozdziale 1) jest niełatwy w odbiorze ze względu na fakt, że Doktorant posługuje się sprawnie abstrakcyjnymi pojęciami, natomiast w ogóle nie decyduje się zilustrować modelowanych pojęć, co utrudnia odbiór czytelnikowi, który nie zajmuje się zwyczajowo podobną tematyką. Można oczywiście założyć, że pojęcie grafu reprezentującego sieć czy zapotrzebowania jest dobrze zrozumiałe, ale już przedstawienie fenomenów związanych z pomniejszaniem przepływów można byłoby po prostu zobrazować z użyciem co najmniej kilku rysunków i bardzo prostych przykładów liczbowych, choćby po to, by schematycznie pokazać pewne podstawowe fenomeny oraz ułatwić czytelnikowi wyrobienie sobie intuicji związanych z wprowadzanym problemem. Przynajmniej dla mnie trudne było przebicie się ze zrozumieniem w odniesieniu do modelowania struktury oraz zakresu dla różnych zagadnień opisywanych w ramach podrozdziałów 2.2.3-2.2.4 i 2.3. Zastrzeżenie to nie wpływa na moją ocenę jakości pracy doktorskiej pod względem merytorycznym i dotyczy w zasadzie tylko samej prezentacji.

Drugi z kluczowych rozdziałów zawierających trzon oryginalnych wyników pracy to rozdział 3. Jest on motywowany faktem, że sformułowane w rozdziale 2 zadania optymalizacji są nietrywialne do rozwiązania. Z jednej strony są niezawarte, gdyż nie da się uwzględnić w ich przypadku wszystkich możliwych ścieżek przepływów, nie mówiąc już o wszystkim możliwych stanach degradacji jakości. Po drugie przynajmniej niektóre sformułowania, głównie zakładające kwadratowy sposób organizacji zmniejszania przepływu (który uwzględnia lokalną informację nt. pogorszenia jakości), wymaga zastosowania zadań jeszcze trudniejszych do rozwiązania (rezygnacja z czystej liniowości). Z tego powodu Doktorant proponuje cały szereg metod związanych z efektywnym rozwiązywaniem zadań: metodę generacji ścieżek (w oparciu o generację kolumn, tzw. PGA, ang. *path generation algorithm*), jak również generację nowych stanów (generację wierszy, tzw. SGA, ang. *state generation algorithm*) w oparciu o podejście związane z użyciem tzw. wielokomórki stanów (ang. *state polytope*). Później w odniesieniu do przypadku liczbowego przedstawionego w rozdziale 4 Doktorant zarysowuje jeszcze schemat używanej przez siebie heurystyki umożliwiającej radzenie sobie ze wspomnianą



nieliniowością. Przedstawiony przez Doktoranta sposób rozwiązywania zadań optymalizacji jest poprawny, co więcej – wysoce oryginalny, matematycznie elegancki, a na koniec – bardzo efektywny. Wykorzystana metoda generacji ścieżek wymagała złożonego potraktowania problemu z użyciem szeregu wzajemnie związanych zadań dualnych, które są wspomagane przez zadania binarne prowadzące do inteligentnego tworzenia nowych ścieżek dopuszczalnych. Oryginalne jest również podejście, które umożliwia w sposób wydajny potraktowanie jednego z ważniejszych aspektów omawianych modeli, tj. eksplozji możliwych stanów opisujących różne sytuacje degradacji jakości. Doktorant dokonał tego z użyciem wspomnianego modelu wielokomórki stanów, czyli struktury matematycznej, która pozwala na uwzględnienie na raz wielu różnych, choć zbliżonych, stanów. Uwalnia to Doktoranta od potrzeby uwzględnienia wykładniczo wielu sytuacji. Podejście jest bardzo eleganckie z punktu widzenia matematycznego i łączy się z atrakcyjną właściwością umożliwiającą opisywanie relatywnie niewielkiego zbioru scenariuszy w celu faktycznego uwzględnienia bardzo ich dużego zakresu (ta kluczowa od strony koncepcyjnej właściwość jest sformułowana – bez dowodu – na str. 21). Metoda opiera się na wprowadzeniu szeregu testów spełnialności (ang. *feasibility tests*), które umożliwiają dodanie nowych scenariuszy. Doktorant najpierw odrębnie przedstawia podejście związane z generacją ścieżek PGA, potem z generacją scenariuszy SGA, a następnie łączy je w ramach jednego algorytmu.

Cały rozdział 4 ma charakter ilustracyjny, pozwalający na zorientowanie się, jakiego rodzaju wyniki są uzyskiwane w przypadku zastosowania podejścia zintegrowanego, jak również jaki jest charakter jakościowy wyników. Najciekawsze (tj. zaskakujące i pozytywne) konkluzje są dwie: po pierwsze – mimo że użyte zadania optymalizacji nie są łatwe do rozwiązania, czas obliczeń jest całkiem nieduży, co czyni je bardzo przydatnymi w praktyce (właśnie dzięki metodom zaproponowanym w rozdziale 3). Po drugie, użycie koncepcji pomniejszania przepływów, mimo że według potencjalnie ambitnych założeń ma prowadzić do niewielkiej degradacji jakości w przypadkach obniżenia poziomu dostępnej przepływności, z punktu widzenia optymalizacji nie pociąga wcale istotnego zwiększenia kosztów konstrukcji sieci (tj. kosztów rozplywu ruchu w sytuacji nominalnej). Wprowadzone przykłady liczbowe są ograniczone do dwóch sieci, ale szczególnie w przypadku drugiej sieci Doktorant był w stanie pozyskać realistyczne informacje dotyczące degradacji jakości w związku z danymi pogodowymi. Niemniej jednak wartościowe byłoby, gdyby Doktorant zwiększył zakres badanych sieci, co najmniej generując dane syntetyczne, choćby po to, żeby zwiększyć wiarygodność statystyczną prezentowanych wyników. Jeśli chodzi o przykład numeryczny to brak mi też głębszego uzasadnienia, skąd biorą się konkretne wartości (np. w odniesieniu do prognoz związanych z oczekiwanym poziomem akceptowalnego ruchu po wystąpieniu uszkodzenia itp.). Oczywiście Doktorant skupia się przede wszystkim na zagadnieniach optymalizacyjnych, ale byłoby również wskazanie wytycznych, czym w praktyce projektowania posługiwać się, żeby mieć możliwość efektywnego zastosowania podejścia traktowanego jako całość koncepcyjna.

W ramach analizy treści od strony merytorycznej nasunęło mi się ponadto kilka wątpliwości, a może raczej pytań wartych przedyskutowania w trakcie obrony. Wymieniam je poniżej (w kolejności od najistotniejszych do zupełnie pobocznych):

- Doktorant budując kontekst techniczny dla proponowanego podejścia optymalizacyjnego w zasadzie abstrahuje od konkretnych aplikacji sieciowych czy technik, w tym protokołów telekomunikacyjnych. Odwołuje się przede wszystkim do ogólnych pojęć, takich jak WMN (kratowe sieci



radiowe) czy FSO (transmisja optyczna w przestrzeni swobodnej). Jest to w rzeczy samej kontekst trafnie uzasadniający możliwość występowania degradacji łączy, ale trzeba pamiętać, że praktyczne wdrożenie proponowanych podejść optymalizacyjnych angażowałoby także konkretne procedury sterowania, o których Doktorant nie pisze wyczerpująco. Autor rozprawy w zasadzie odnosi się nieco dokładniej do koncepcji protokołowej związanej z MPLS, ale tutaj też nie pogłębia opisu scenariuszy, w ramach których można byłoby zastosować proponowane podejścia. Powstaje pytanie: na ile używane w stosowanych protokołach mechanizmy pozwalają na aplikację przedstawionych podejść? To jest przede wszystkim: w jaki sposób odwzorować rozwiązania zadań optymalizacji na konkretne ustawienia konfiguracyjne? Przydałaby się co najmniej prosta ilustracja sytuacji opisującej, gdzie w ogóle proponowane podejście mieści się w cyklu projektowania sieci w płaszczyźnie zarządzania oraz późniejszego sterowania ruchem w trakcie działania sieci produkcyjnej.

- Przykłady liczbowe zaprezentowane w ramach rozdziału 4 są bardzo ciekawe, gdyż potwierdzają od strony eksperymentalnej, że opracowane metody rozwiązywania niełatwych zadań optymalizacji z jednej strony okazują się efektywnie rozwiązywalne (co potwierdza sensowność całego rozdziału 3, który traktuję jako główny uzysk koncepcyjny), a z drugiej strony pozwalają zorientować się, że użyte podejście optymalizacyjne jest zasadne z punktu widzenia oszczędności zasobów, czemu oczywiście powinno służyć. Ze względu na poprawę wiarygodności wyników byłoby zasadne użycie większej liczby sieci służących jako podstawa do generowania pokazywanych i analizowanych liczb. Rozumiem, że w ogólności pozyskanie danych rzeczywistych (np. odnoszących się do degradacji jakości) jest mało prawdopodobne, ale mimo wszystko byłoby ciekawe zaobserwować, jak to w przypadku badań eksperymentalnych, chociażby wyniki związane z randomizowaną syntezą parametrów niezawodnościowych, czy nawet wyniki na losowanych strukturach sieciowych. Czy Doktorant ma koncepcję dotyczącą tego, w jaki sposób można np. powiązać poziom oczekiwanego do zrealizowania wolumenu ruchu z wielkością degradacji przepływności?
- Na str. 2-3 Doktorant przedstawia zalety transmisji FSO w opozycji do klasycznej transmisji światłowodowej, zwracając uwagę na: działanie bez licencji (na pasmo?), wysokie poziomy przepływności oraz zwiększony poziom bezpieczeństwa. Muszę powiedzieć, że wszystkie te argumenty wydają mi się mocno dyskusyjne w kontekście takiego akurat porównania. Czy nie chodziło raczej o porównanie z klasyczną transmisją radiową?
- Na str. 1 Doktorant charakteryzuje koncepcję rozptyłu ruchu, pisząc że „*amount of traffic directed to each tunnel is an affine combination of link capacities*”. Powiedziałbym, że ilość ruchu transmitowana w ramach zapotrzebowania to albo kombinacja liniowa różnych przepływów albo (w przypadku pojedynczego przepływu) wartość ograniczona od góry minimum z przepływności dostępnych na łączach tworzących konkretną ścieżkę przepływu. Nie do końca rozumiem zamieszczone zdanie. Być może pomógłby rysunek objaśniający, co Doktorant ma na myśli.



## **5. ORYGINALNOŚĆ ROZPRAWY, SAMODZIELNY DORÓBEK AUTORA, POZYCJA ROZPRAWY W STOSUNKU DO STANU WIEDZY (POZIOM TECHNIKI) PREZENTOWANEGO W LITERATURZE ŚWIATOWEJ.**

Wyniki przedstawione w pracy już zyskały uznanie międzynarodowej społeczności badawczej. W dużym stopniu tekst pracy jest oparty na wynikach wcześniej opublikowanych przez Doktoranta (we współautorstwie z innymi badaczami). Zamieszczone w bibliografii teksty to referaty na konferencjach międzynarodowych (jako główne wymienię pięć z nich: [46] na DRCN 2020, [51] na RNDM 2017, [52] na INOC 2017, [54] na RNDM 2018, [64] na RNDM 2019 – są to wszystko uznane konferencje prezentujące wyniki związane z niezawodnością sieci oraz optymalizacją, co tematycznie stanowi rdzeń rozprawy) i rozdział [49] w książce, ale także zgromadzone w imponująco dużej liczbie jak na doktorat teksty artykułów zamieszczone w bardzo cenionych periodykach naukowych (teksty [27] w *Networks* i [28] w *IEEE Access*, których Doktorant jest pierwszym współautorem; wymienić można też [38] oraz [55] w *Optical Switching and Networking*, [53] w *Electronic Notes in Discrete Mathematics* czy [66] w *Computer Networks*).

Jako główne aspekty nowości przedstawione w rozprawie wskazuję co następuje:

- Podjęcie trudnego do modelowania aspektu projektowania sieci, zakładającego obsługę ruchu przy różnych scenariuszach degradacji jakości łączy. Jednocześnie zagadnienie to ma duży potencjał praktyczny, a jego rozwiązanie prowadzi do faktycznych oszczędności, co oczywiście jest dobrym uzasadnieniem do wykorzystania podejścia optymalizacyjnego.
- Przedstawienie bardzo oryginalnego i wnikliwego sposobu rozwiązania tego zagadnienia, w oparciu o generację kolumn oraz generację wierszy z użyciem podejścia opartego na modelowaniu za pomocą wielokomórkowych stanów.

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

Praca jest napisana w sposób jasny. Idee są prezentowane zwięźle (być może niekiedy nawet z pewną przesadą, o czym pisałem już wcześniej). Biorąc pod uwagę, że w ramach pracy należało bardzo precyzyjnie przedstawić szereg sformułowań zadań optymalizacji, doceniam kilka podjętych decyzji oraz konsekwentne realizowanie pomysłu na spójny formalizm matematyczny, w tym:

- czytelne rozróżnianie stałych i zmiennych zadań optymalizacji (odmienne sposoby indeksowania);
- wygodny sposób numerowania formuł, umożliwiający efektywne odnoszenie się do nich (duża liczba przedstawionych zadań jest ze sobą powiązana).

Praca jest napisana po angielsku bardzo eleganckim i dobrze zrozumiałym językiem. Nie dostrzegłem prawie w ogóle potknięć lingwistycznych (błędów gramatycznych, stylistycznych czy nawet literówek). Kilka niewielkich uwag zbieram poniżej. Są to w gruncie rzeczy niewielkie niedopatrzania redakcyjne, typograficzne, językowe, literówki, ew. kontrowersyjne decyzje dotyczące sposobu pisania itd.:

- Spis użytych oznaczeń matematycznych *List of Symbols* podany na początku jest bardzo pomocny w trakcie czytania pracy, ale jego użyteczność osłabia kilka nietrafnych decyzji:
  - niekonsekwentna kolejność wprowadzonych oznaczeń (chyba nie jest ani alfabetyczna ani nie łączy się nawet z kolejnością definiowania pojęć w pracy);
  - brakuje niektórych oznaczeń, które jednak dosyć często występują w tekście pracy (np. związanych ze zmiennymi  $z$ ; ich interpretacja w ogólności nastrocza pewnych trudności);
  - niekonsekwentnie wprowadzono informację, czy oznaczenie reprezentuje stałą (parametr) zadań czy zmienną, np. w przypadku  $c(e)$  zamieszczono informację, że to stała, ale w przypadku  $h(d,s)$  już nie.
- Konkretnie decyzje związane z notacją matematyczną: Doktorant dopuszcza niekiedy do kolizji oznaczeń, przy czym o ile można zrozumieć, że pewne związane ze sobą pojęcia używają tego samego oznaczenia, które zresztą jest rozróżniane np. indeksowaniem (tak jest choćby w przypadku różnych zestawów łączy  $\varepsilon(d,p)$  i  $\varepsilon(s)$ ), o tyle jest nieco mylące używanie tych samych oznaczeń w odniesieniu do jednak innych pojęć (np. wskaźnik użycia łączy w określonej ścieżce dopuszczalnej  $\delta(e,d,p)$  oraz zestaw łączy incydentnych z wierzchołkiem  $\delta(v)$ ); nie stanowi to może dużego problemu, ale wymaga od czytelnika większego obciążenia pamięci odpowiednimi rozróżnieniami.
- Opis literaturowy:
  - trzeci autor pracy [35] to „Steinmetz”, a nie „Steimetz”;
  - pozycję [49] należałoby uzupełnić o informację, że jest to rozdział w książce „Guide to Disaster-Resilient Communication Networks”;
  - w tytule pozycji [74] należałoby poprawnie zapisać skrótowiec „WDM” (zamiast „wdm”);
- Niewielka liczba literówek, np. na str. 8 („focussed”) czy str. 48 („repsect”).

W ogólności aspekt edycyjny jest na bardzo wysokim poziomie.

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

Pewne moje zastrzeżenia wyraziłem już wcześniej, więc tutaj je tylko podsumowuję. Nie są to w ogóle istotne braki o charakterze merytorycznym, a raczej potknięcia w prezentacji, ewentualnie niewystarczające objaśnienia i dopowiedzenia. W ogólności waga wskazanych słabszych stron jest niewielka, jeśli wziąć pod uwagę jakość wszystkich wyników związanych z rozprawą.

- Brak wyczerpującej analizy literaturowej. Doktorant potraktował zagadnienie bardzo pobocznie. W zasadzie nie wydzielił nawet większej struktury na ten temat.
- Brak przedstawienia szerszego kontekstu technicznego. Doktorant wprowadzie gdzieś tam nawiązuje do konkretnych koncepcji technicznych, ale w zasadzie rzadko uwzględnia konkretne protokoły, dzięki którym można byłoby aplikować proponowane rozwiązania



optymalizacyjne. O ile nawiązania do sieci radiowych i optycznych (tj. związanych z transmisją w przestrzeni swobodnej) są przekonujące, o tyle brakuje mi głębszego odniesienia do kontekstu niezawodnościowego w sieciach stałych, gdzie np. protokół OpenFlow wydaje się oferować narzędzia bardzo dobrze obsługujące proponowane mechanizmy (w sumie Doktorant wprost deklaruje, że nie chce odnosić się do sieci SDN, ale w zasadzie nie rozumiem, dlaczego z nich rezygnuje w ramach wprowadzenia kontekstu). Z tego punktu widzenia warto byłoby zapewne szerzej opracować plany badawcze na przyszłość, które bardzo ograniczono w zakończeniu rozdziału 5.

- Przykłady liczbowe, opracowane w ramach treści rozdziału 4, są bardzo cenne, natomiast nie jest ich dużo. Doktorant oparł się na dwóch scenariuszach sieciowych, które mają swoją zasadność (np. sieć *polska* jest powszechnie znana i używana w badaniach optymalizacyjnych, z kolei w ramach drugiej sieci Doktorant dysponował niezwykle tutaj adekwatnymi danymi związanymi z praktyczną degradacją jakości na łączach). Byłoby jednak korzystne, gdyby wyniki o charakterze eksperymentalnym, a taki charakter mają wyniki ilościowe w tym przypadku, zostały poparte badaniami na większej liczbie scenariuszy (np. może powstać pytanie w odniesieniu do macierzy ruchu zaprezentowanej w Tab. 4.6, na ile jest on reprezentatywny, skoro zapotrzebowanie między jedną parą wierzchołków w zasadzie jest dominujące?).
- Praca jest silnie teoretyczna, co moim zdaniem jest jej dużą wartością. Z drugiej strony wprowadza to dużą trudność dla czytelnika. Tutaj trzeba powiedzieć, że Doktorant nie zadał sobie zbyt dużo trudu, żeby wytłumaczyć niektóre koncepcje, którymi się posługuje. Wprawdzie tekst objaśniający, jak również wzory, są dosyć czytelne, ale za wadę z punktu widzenia prezentacji uznaję rezygnację z rysunków, które mogłyby jednak objaśnić wprowadzane koncepcje, a nie są one przecież powszechnie znane (co zresztą uzasadnia oryginalność doktoratu). W ogóle w całej pracy zamieszczono tylko dwa rysunki. Przez to czytelnik musi opierać się tylko na abstrakcie matematycznym (podstawowe koncepcje nie są też tłumaczone z użyciem nawet prostych przykładów liczbowych), co wymaga bardzo dużej wyobraźni matematycznej. Liczę, że Doktorant w trakcie obrony przedstawi koncepcje w nieco przystępniejszy sposób.

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

Rozprawa dotyczy twórczego i nowatorskiego zastosowania metod optymalizacji w projektowaniu sieci (i zarządzaniu oraz sterowaniu nimi). Jednakże, co szczególnie doceniam, badania są inspirowane jak najbardziej praktycznym zagadnieniem, na temat tego w jaki sposób efektywnie zachować się w przypadku wystąpienia uszkodzeń oraz innych sytuacji prowadzących do degradacji jakości. Doktorant osadził badania w ogólnym kontekście telekomunikacyjnym, a następnie przedstawił szereg zadań optymalizacji, których rozwiązanie wymaga niemałych kompetencji od strony teoretycznej. Użyte techniki rozwiązywania problemu zostały przekonująco przedstawione od strony koncepcyjnej, a jakość rozwiązań została zilustrowana eksperymentalnie.

W podsumowaniu mogę zatem stwierdzić, że recenzowana praca doktorska jako przedmiot przyjęła doniosły problem w zakresie telekomunikacji, który został poprawnie rozwiązany. Nie mam wątpliwości że jej przedmiotem jest oryginalne rozwiązanie istotnego problemu naukowego oraz że prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Autora rozprawy w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja, jak również potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej (co dowodzą także liczne publikacje).

Jak napisałem, użyte podejście optymalizacyjne jest bardzo wysokiej jakości, z tego powodu, jak również dlatego, że wyniki prezentowane w doktoracie już uzyskały pozytywny odbiór społeczności naukowej (czego dowodzą artykuły w bardzo cenionych periodykach), uważam, że rozprawa jest wybitnie dobra i zasługuje na wyróżnienie.



Piotr Chołda