

Wrocław, 31 maja 2021

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

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY DYSCIPLINY 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 łącach 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 rozważanych 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 rozważany 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...