

Wrocław, 10 maja 2021

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Walkowiak
Wydział Elektroniki
Politechnika Wrocławska

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY DISCYPLINY INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA
AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ W KRAKOWIE**

Autorka rozprawy doktorskiej: mgr inż. Edyta Biernacka

Tytuł rozprawy doktorskiej: „*Elastic Optical Bypasses in Multi-Layer Networks*”

Promotor: dr hab. inż. Jerzy Domżał, prof. uczelni.

Promotor pomocniczy: dr inż. Piotr Boryło

1. Zakres i charakter rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Edyty Biernackiej dotyczy zagadnień związanych z sieciami teleinformatycznymi, w szczególności zagadnień dotyczących optymalizacji sieci wielowarstwowych. Analizowana w rozprawie sieć wielowarstwowa składa się z warstwy protokołu IP oraz warstwy optycznej wykorzystującej elastyczne sieci optyczne EON (ang. *elastic optical network*). EON to nowoczesna koncepcja realizacji światłowodowych sieci optycznych umożliwiająca transmisje z bardzo dużymi przepustowościami o wartościach przekraczających możliwości poprzedniej generacji sieci optycznych opartych na technologii DWDM (ang. *Dense Wavelength Division Multiplexing*). Dodatkowa zaleta sieci EON to możliwość elastycznej i dynamicznej alokacji spektrum dla poszczególnych połączeń, w przeciwieństwie do alokacji w ramach stałej siatki częstotliwości w sieciach DWDM. W architekturze sieciowej przyjętej w rozprawie, współpraca między warstwą IP i warstwą optyczną jest realizowana z wykorzystaniem koncepcji sieci sterowanych programowo SDN (ang. *software defined networking*), co jest zgodne z najnowszymi trendami obserwowanymi w sieci teleinformatycznych. Koncepcja SDN zyskuje w ostatnich latach dużą popularność w związku z rosnącymi potrzebami operatorów sieciowych w zakresie zapewnienia większej efektywności działania sieci i optymalizacji kosztów.

Rozprawa doktorska ma charakter zarówno poznawczy jak i użytkowy. W zakresie rozważań teoretycznych, mgr inż. Edyta Biernacka opracowała nowy algorytm alokacji ścieżek optycznych w sieci EON o nazwie MSEwLSF (ang. *Most spectrally efficient path with the largest slices first*), który został zaprojektowany dla realizacji koncepcji dodatkowej ścieżki optycznej (nazywanej "bypass"). Natomiast aspekt użytkowy rozprawy doktorskiej jest związany z implementacją zaproponowanego algorytmu i innych referencyjnych algorytmów w środowisku symulacyjnym oraz przeprowadzeniem

wszechstronnych badań eksperymentalnych pokazujących jakość działania zaproponowanego algorytmu oraz właściwości stosowania koncepcji dodatkowej ścieżki optycznej służącej do obsłużenia nadmiarowego ruchu w sieci.

2. Zawartość rozprawy

Rozprawa składa się z 4 części zawierających w sumie 10 rozdziałów. Pierwszy rozdział to wprowadzenie opisujące motywację tematu rozprawy oraz tezę doktoratu. Rozdział 2 zawiera opis podstawowych zagadnień związanych z tematyką rozprawy doktorskiej, w tym dotyczących sieci wielowarstwowych, koncepcji SDN, elastycznych sieci optycznych. W rozdziale 3 Doktorantka przedstawiła przegląd literaturowy dotyczący obszarów badawczych poruszanych w rozprawie. Rozdział 4 zawiera opis notacji stosowanej w rozprawie. W rozdziale 5 mgr inż. Edyta Biernacka definiuje i analizuje dynamiczne algorytmy zestawienia ścieżek optycznych oraz przydziału zasobów widma optycznego sieciowych. Następnie, w rozdziale 6 omówiona jest koncepcja dodatkowej ścieżki optycznej typu "bypass". Rozdział 7 opisuje środowisko symulacyjne wykorzystane do przeprowadzenia badań oraz założenia przyjęte dla przeprowadzonych symulacji. W rozdziale 8 Doktorantka przedstawiła i przedyskutowała wyniki badań dotyczących algorytmów zestawiania ścieżek optycznych w sieciach EON. Z kolei rozdział 9 zawiera wyniki dotyczące skuteczności stosowania dodatkowej ścieżki optycznej typu "bypass" wraz z ich dokładną analizą. Ostatni rozdział 10 zawiera podsumowanie rozprawy. W mojej ocenie struktura rozprawy doktorskiej jest prawidłowa. Doktorantka w logiczny i przejrzysty sposób przedstawiła 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

Teza rozprawy jest sformułowana w następujący sposób: *jest możliwe, że zastosowanie dodatkowych elastycznych ścieżek optycznych (ang. elastic optical bypasses) w sieciach wielowarstwowych przynosi korzyści w zakresie wykorzystania zasobów i niższego prawdopodobieństwa blokowania dynamicznego ruchu sieciowego w porównaniu do sytuacji kiedy dodatkowe elastyczne ścieżki optyczne nie są stosowane (It is possible that application of elastic optical bypasses in multi-layer networks brings advantages in terms of resource utilization and lower bandwidth blocking probability when compared to non-bypasses under dynamic traffic scenarios).*

W mojej opinii teza rozprawy jest sformułowana w poprawny sposób. Mgr inż. Edyta Biernacka na podstawie przeglądu literaturowego i własnej wiedzy prawidłowo określiła zakres swojej rozprawy, koncentrując się na aktualnych i ważnych aspektach związanych ze współczesnymi sieci teleinformatycznymi.

Teza została wykazana w rozprawie doktorskiej poprzez:

- Zaproponowanie nowego algorytmu alokacji ścieżek optycznych w elastycznych sieciach optycznych MSEwLSF (ang. *Most spectrally efficient path with the largest slices first*).
- Implementację algorytmu MSEwLSF oraz algorytmów referencyjnych w środowisku symulacyjnym.
- Implementację koncepcji dodatkowych elastycznych ścieżek optycznych (ang. *elastic optical bypasses*) w środowisku symulacyjnym.
- Przeprowadzenie obszernych eksperymentów symulacyjnych i analizę uzyskanych wyników.

Według mojej opinii mgr inż. Edyta Biernacka rozwiązała postawiony problem naukowy stosując prawidłowe metody badawcze. Dla wykazania tezy rozprawy Doktorantka użyła eksperymentów symulacyjnych, w których zaimplementowała zaproponowane metody i następnie dla stworzonych scenariuszy badawczych przeprowadziła szereg badań symulacyjnych. Wyniki przedstawione w rozprawie zostały opatrzone dokładną analizą i dyskusją.

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

Rozprawa doktorska mgr inż. Edyty Biernackiej dotyczy aktualnych zagadnień związanych z wielowarstwowymi sieciami teleinformatycznymi. Doktorantka przeprowadziła dokładny przegląd literaturowy. Lista pozycji bibliograficznych umieszczona w rozprawie zawiera 99 publikacji naukowych. Wśród nich znajdują się najważniejsze prace związane z tematyką dynamicznych algorytmów alokacji ścieżek optycznych w elastycznych sieciach optycznych, optymalizacji sieci wielowarstwowych oraz zastosowania koncepcji SDN do zarządzania sieciami wielowarstwowymi. Stanowi to dobre wprowadzenie do dalszej części rozprawy prezentującej oryginalne koncepcje Doktorantki oraz ułatwia lekturę rozprawy. Moim zdaniem, Doktorantka posiada dostateczną wiedzę i znajomość współczesnej literatury z zakresu związanej 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 wielowarstwowych sieci teleinformatycznych w celu zmniejszenia współczynnika blokady ruchu sieciowego, a w efekcie umożliwienia obsłużenia w sieci większej liczby klientów są obecnie ważnym tematem uwzględniając nieustannie rosnący wolumen ruchu w sieciach teleinformatycznych.

W rozprawie poruszane są zagadnienia z wielu obszarów telekomunikacji i informatyki, w tym dotyczących sieci optycznych oraz zarządzania wielowarstwowymi sieciami teleinformatycznymi. Rozprawa doktorska zawiera zarówno aspekty teoretyczne związane z opracowaniem oryginalnego algorytmu alokacji ścieżek optycznych w sieci EON, jak i aspekty praktyczne związane z implementacją analizowanych algorytmów w systemie symulacyjnym, opracowaniem scenariuszy

badani uwzględniających aktualnie stosowane technologie oraz przeprowadzeniem szerokich eksperymentów obliczeniowych.

6. Znaczenie uzyskanych wyników dla danej dyscypliny naukowej

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

- Opisanie i przeanalizowanie różnych metod alokacji ścieżek optycznych w elastycznych sieciach optycznych uwzględniających zadanie wyznaczania ścieżki routingu oraz zadanie alokacji widma optycznego.
- Opracowanie nowego algorytmu MSEwLSF umożliwiającego alokację ścieżek optycznych w elastycznych sieciach optycznych.
- Opracowanie koncepcji zastosowania dodatkowej ścieżki optycznej (ang. *optical bypass*) w elastycznych sieciach optycznych w celu obsługi nadmiarowego ruchu sieciowego.
- Implementacja opracowanego algorytmu MSEwLSF oraz referencyjnych algorytmów w symulatorze OMNeT++.
- Implementacja koncepcji dodatkowej ścieżki optycznej (ang. *optical bypass*) w symulatorze OMNeT++.
- Opracowanie scenariuszy badań z uwzględnieniem różnych metod generowania ruchu sieciowego, w tym z wykorzystaniem wybranych za pomocą miar topologicznych węzłów, dla których w sieci pojawia się chwilowe zwiększenie wolumenu ruchu.
- Dokładna analiza uzyskanych wyników pod kątem efektywności poszczególnych algorytmów wyznaczania ścieżek optycznych mierzonej za pomocą prawdopodobieństwa blokady ruchu (ang. *bandwidth blocking probability*), średniej długości wybranych ścieżek routingu wyrażonej za pomocą liczby przeskoków, średnim zużyciem widma optycznego.
- Dokładna analiza uzyskanych wyników pod kątem efektywności stosowania koncepcji dodatkowej ścieżki optycznej (ang. *optical bypass*) mierzonej za pomocą prawdopodobieństwa blokady ruchu (ang. *bandwidth blocking probability*), średniej długości wybranych ścieżek routingu wyrażonej za pomocą liczby przeskoków, średnim zużyciem widma optycznego.

Należy podkreślić, że opracowane koncepcje oraz uzyskane wyniki mają duże znaczenia praktyczne. Doktorantka zdefiniowała i następnie rozwiązała realny i aktualny problem badawczy związany z działaniem wielowarstwowych sieci teleinformatycznych.

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

Uwagi natury ogólnej:

- Główna wada rozprawy to niewystarczająco szczegółowe przedstawienie założeń przyjętych w czasie przeprowadzenia symulacji działania rozwiązania dodatkowej ścieżki optycznej (ang. *optical bypass*). Brak tych informacji może utrudnić zaimplementowanie przedstawionych

rozwiązań i powtórzenie badań w celu zweryfikowania wyników (tzw. replikacja eksperymentu).
W szczególności, nie jest dla mnie jasne:

- W jaki sposób są zestawiane ścieżki optyczne dla obsłużenia ruchu sieciowego w sieci wielowarstwowej. Analizując treść rozprawy zakładam (ale nie jest to wprost napisane), że topologia wirtualna ścieżek optycznych jest taka sama jak fizyczna topologia sieci (w rozprawie napisano „Particularly, topologies for the IP and optical layers were the same.”), czyli dla każdej pary sąsiednich węzłów (tworzących łącze w warstwie fizycznej) jest tworzona ścieżka optyczna. Również wartości średniej liczby przeskoków (ang. *average number of hops*) widoczne na prezentowanych wykresach wskazują, że ścieżki optyczne są zestawiane między sąsiednimi węzłami w takiej samej topologii jak topologia fizyczna. Poza tym w rozprawie jest informacja, że topologia wirtualna jest przygotowana wcześniej (“The topology of the virtual layer was pre-established”).
- Jakie są przepustowości zestawianych ścieżek optycznych w warstwie wirtualnej?
- Czy między każdą parą sąsiednich węzłów (łącza fizyczne) są zestawiane ścieżki o tej samej przepustowości, czy to jest w jakiś sposób różnicowane? Np. dla łączy, w których przewidywany jest większy ruch, zestawiane są ścieżki optyczne o większej przepustowości.
- Czy dla danego łącza warstwy wirtualnej (i jednocześnie warstwy fizycznej) jest zestawiana wyłącznie jedna ścieżka optyczna, czy też możliwy jest scenariusz, że zestawianych jest więcej równoległych ścieżek optycznych?
- Zasoby optyczne (spektrum) są ograniczone i wynoszą 320 slotów optycznych (lub mniej, jeżeli część slotów jest rezerwowanych na bypass). W jaki sposób jest kontrolowane wykorzystanie tych zasobów w czasie zestawiania ścieżek optycznych warstwy wirtualnej? To pytanie jest związane z poprzednimi pytaniami.
- Czy ścieżki optyczne w warstwie wirtualnej są zestawiane na stałe, czy w sytuacji kiedy ruch w warstwie IP się zmienia, to jest możliwość zestawienia nowych ścieżek lub zmiany już istniejącej topologii wirtualnej?
- Czy liczba dostępnych w sieci transponderów jest ograniczona w czasie tworzenia warstwy wirtualnej, czyli czy może się pojawić sytuacja, w której następuje blokada z powodu niewystarczającej liczby transponderów potrzebnych dla nowej ścieżki optycznej?
- Teza rozprawy jest dość oczywista, szczególnie uwzględniając fakt, że zaproponowana koncepcja dodatkowych elastycznych ścieżek optycznych (ang. *elastic optical bypasses*) została zaimplementowana w sieci z wykorzystaniem specjalnego algorytmu MSEwLSF, który może analizować wiele potencjalnych ścieżek routingu. Rozwiązanie referencyjne (sieć bez mechanizmu dodatkowych elastycznych ścieżek optycznych) jest oparta na podstawowym algorytmie routingu OSPF, więc wynik porównania obu koncepcji jest dość przewidywalny. Pewien niedosyt budzi to, że Doktorantka nie zdecydowała się na sformułowanie i następnie zbadanie mniej oczywistej tezy rozprawy.

- Teza rozprawy w dużym stopniu opiera się na porównaniu dwóch scenariuszy: sieć bez dodatkowej ścieżki optycznej (non-bypass) oraz sieć stosująca dodatkowe obejście ścieżki optycznej (bypass). Jednak – jak napisałem powyżej – konfiguracja podejścia non-bypass opiera się na prostych algorytmach: OSPF w warstwie IP i warstwie wirtualnej odwziewiedlającej fizyczną topologię sieci (jeżeli dobrze odczytuję informacje zawarte w rozprawie – patrz powyższe uwagi). Z drugiej strony dla zestawienia dodatkowej ścieżki optycznej (bypass) zastosowano zaawansowany algorytm MSEwLSF. Wadą rozprawy jest fakt, że Doktorantka nie zastosowała innych rozwiązań w zakresie optymalizacji sieci dla referencyjnego scenariusza non-bypass, np. ścieżki optyczne tworzące sieć wirtualną są dynamicznie zestawiana za pomocą algorytmu MSEwLSF albo w warstwie IP są stosowane bardziej zaawansowane algorytmy niż OSPF.
- Wykresy prezentujące procent blokady ruchu (ang. *bandwidth blocking probability*) mają na osi pionowej wartości prezentowane w normalnej skali. Częstym podejściem w pracach naukowych przedstawiających podobne wyniki jest stosowanie skali logarytmicznej, dzięki czemu lepiej widoczne są różnice między poszczególnymi metodami dla stosunkowo małych wartości blokady, np. poniżej 1%. Z praktycznego punktu widzenia dla operatorów sieciowych wartości blokady powyżej 1% są nieakceptowalne w powodów biznesowych, bo oznaczają brak możliwości obsłużenia sporej grupy klientów.
- W podsumowaniu rozprawy nie zostały podane planowane w przyszłości dalsze prace badawcze (ang. *future works*).
- W rozprawie brakuje odniesienia się do nowej koncepcji sieci optycznych SDM (ang. *space division multiplexing*), np. omówienia potencjalnych możliwości zastosowania koncepcji dodatkowej ścieżki optycznej (bypass) w sieciach SDM.

Uwagi szczegółowe:

- Algorytmy przedstawione w rozdziałach 5.1.1, 5.1.2 oraz 5.1.3 nie zostały przedstawione w wystarczająco dokładny sposób umożliwiający jednoznaczną ich implementację w celu zastosowania i zweryfikowania przedstawionych koncepcji. W szczególności, nie jest jasne jakie dodatkowe kryterium zastosować w procedurze sortowania w sytuacji kiedy jest remis, np. kiedy w algorytmie SPF dwie ścieżki mają taką samą długość.
- Natężenie ruchu sieciowego jest mierzone za pomocą jednostek Erlang, co przez wiele lat było powszechnie przyjętym podejściem w czasie symulacji sieci teleinformatycznych. Jednak w kontekście analizowanego ruchu sieciowego (zestawiane zapotrzebowania (ang. *requests*) mają wartość od 50 Gbit/s do 1 Tbit/s) oraz możliwości sieci EON w zakresie elastycznej siatki częstotliwości (ang. *flex-grid*) to podejście nie do końca oddaje natężenie ruchu sieciowego. Jednostka Erlang szacuje liczbę zapotrzebowań (ang. *requests*) aktualnie będących obsługiwanych w sieci. Ale w rozprawie te zapotrzebowania mają mocno zróżnicowaną przepustowość, więc w efekcie w zależności od przepustowości zapotrzebowania obciążenie sieci może się mocno różnić.

- Ruch w tle ma stałe wartości dla poszczególnych par węzłów (“The first traffic type was long-lived background traffic between each pair of nodes with bit rate equal to 200 Gbit/s for the NSF15 network and 80 Gbit/s for the UBN24 network.”). Z kolei ruch nadmiarowy ma różne wartości w zakresie od 50 Gbit/s do 1 Tbit/s („For each pair of selected nodes demands were uniformly distributed between 50 Gbit/s and 1 Tbit/s with a 50 Gbit/s step (with an average value of 525 Gbit/s.”). Nie jest jasne jak w warstwie IP jest zestawiany ruch nadmiarowy, szczególnie o wysokiej wartości natężenia (np. 1 Tbit/s).
- Dla scenariusza bez dodatkowej ścieżki optycznej (non-bypass) wartość użytego widma optycznego wynosi 4 THz (np. rys. 9.5). Czy to oznacza, że całe widmo optyczne jest zaalokowane dla ścieżek optycznych warstwy wirtualnej? Jeżeli tak, to warto byłoby podać średnie wykorzystanie przepustowości dla warstwy IP.

8. Konkluzja

Recenzowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie jednoznacznie sformułowanego zagadnienia naukowego. Mgr inż. Edyta Biernacka wykazała 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. Edyty Biernackiej 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. L. 1

