Załącznik 3:
Autoreferat

1. Imię i nazwisko.

   Róża Goścień

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

   - **XII 2016: Doktor nauk technicznych w dyscyplinie Informatyka.**

     Stopień naukowy nadany decyzją Rady Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej.
     Tytuł rozprawy: Optimization algorithms for survivable elastic optical networks
     Promotor: prof. dr hab. inż. Krzysztof Walkowiak

     Rozprawa obroniona z wyróżnieniem.
     Rozprawa otrzymała Nagrodę Prezesa Rady Ministrów za wyróżniającą się rozprawę doktorską.

   - **XII 2013: Magister inżynier na kierunku Teleinformatyka.**

     Studia magisterskie na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Kierunek: Teleinformatyka, specjalność: Projektowanie sieci teleinformatycznych.

     Studia ukończone z Nagrodą Dziekana Wydziału Elektroniki za najlepszą pracę magisterką i Nagrodą Dziekana Wydziału Elektroniki dla najlepszego absolwenta wydziału.

   - **II 2021: Inżynier na kierunku Teleinformatyka.**

     Studia inżynierskie na Wydziale Elektroniki, Politechniki Wrocławskiej. Kierunek: Teleinformatyka.

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

   - II 2015 – obecnie **Politechnika Wrocławska**, Wydział Informatyki i Telekomunikacji (do 14.09.2021 Wydział Elektroniki), Katedra Systemów i Sieci Komputerowych (Wrocław, Polska)
     - X 2017 – obecnie adiunkt badawczo-dydaktyczny
     - II 2015 – IX 2017 asystent badawczo-dydaktyczny

- VIII 2013 – XI 2014 **Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy** (Wrocław, Polska)
    - V 2014 – XI 2014 młodszy specjalista inż.-tech. (pracownik naukowy)
    - VIII 2013 – IV 2014 stażysta (pracownik naukowy)

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnieć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.

4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

W ramach niniejszego wniosku habilitacyjnego prezentowane jest osiągnięcie będące cyklem powiązanych publikacji naukowych zatytułowanym:

„***Modele i algorytmy optymalizacji przeżywalnych transportowych sieci optycznych***".

W skład cyklu wchodzi 8 prac opublikowanych w międzynarodowych czasopismach naukowych, z których każde posiada współczynnik *Impact Factor* oraz jest indeksowane na liście *Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego* (*MNiSW*).

W skład osiągnięcia wchodzą następujące prace:

1.) [O1] **R . Goścień**, M. Kucharzak, „On the efficient optimization of unicast, anycast and multicast flows in survivable elastic optical networks", Optical Switching and Networking 31, pp. 114-126, 2019.

Liczba punktów MNiSW[1]:	40
Impact Factor:	2.786
Liczba cytowań[2]:	4/4/4
Szacowany udział:	75%

2.) [O2] **R. Goścień**, M. Lozano, „Artificial Bee Colony for optimization of cloud-ready and survivable elastic optical networks", Computer Communications 128, pp. 35-45, 2018.

[1] Liczba punktów MNiSW, współczynniki Impact Factor oraz liczba cytowań podane wg stanu na 19.09.2021
[2] Wg następujących baz danych: Google Scholar / Web of Science / Scopus

Liczba punktów MNiSW: 140
Impact Factor: 3.167
Liczba cytowań: 7/5/7
Szacowany udział: 85%

3.) [O3] **R. Goścień**, K. Walkowiak, „Modeling and optimization of data center location and routing and spectrum allocation in survivable elastic optical networks", Optical Switching and Networking 23, pp. 129-143, 2017.

Liczba punktów MNiSW: 40
Impact Factor: 2.786
Liczba cytowań: 13/10/11
Szacowany udział: 80%

4.) [O4] **R. Goścień**, „On the Efficient Design of Network Resilient to Electro-Magnetic Pulse Attack - Elastic Optical Network Case Study", Computer Communications 179, pp. 272-284, 2021.

Liczba punktów MNiSW: 140
Impact Factor: 3.167
Liczba cytowań: 0/0/0
Szacowany udział: 100%

5.) [O5] **R. Goścień**, K. Walkowiak, „On the efficiency of survivable flex-grid SDM networks", Journal on Lightwave Technology 36(10), pp. 1815-1823, 2018.

Liczba punktów MNiSW: 100
Impact Factor: 4.142
Liczba cytowań: 13/8/11
Szacowany udział: 80%

6.) [O6] M. Przewoźniczek, **R. Goścień**, P. Lechowicz, K. Walkowiak, „Metaheuristic algorithms with solution encoding mixing for effective optimization of SDM optical networks", Engineering Applications of Artificial Intelligence 95, pp. 103843, 2020.

Liczba punktów MNiSW: 140
Impact Factor: 6.212
Liczba cytowań: 2/2/2
Szacowany udział: 30%

7.) [O7] **R. Goścień**, „On the Efficient Flow Restoration in Spectrally-Spatially Flexible Optical Networks", Electronics 10(12), pp. 1468, 2021.

Liczba punktów MNiSW:	100
Impact Factor:	2.397
Liczba cytowań:	0/0/0
Szacowany udział:	100%

8.) [O8] **R. Goścień**, P. Ksieniewicz, „Efficient Dynamic Routing in Spectrally-Spatially Flexible Optical Networks based on Traffic Categorization and Supervised Learning Methods", Optical Switching and Networking, 100650, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.osn.2021.100650.

Liczba punktów MNiSW:	40
Impact Factor:	2.786
Liczba cytowań:	0/0/0
Szacowany udział:	70%

4.2 Wprowadzenie i umotywowanie prac badawczych

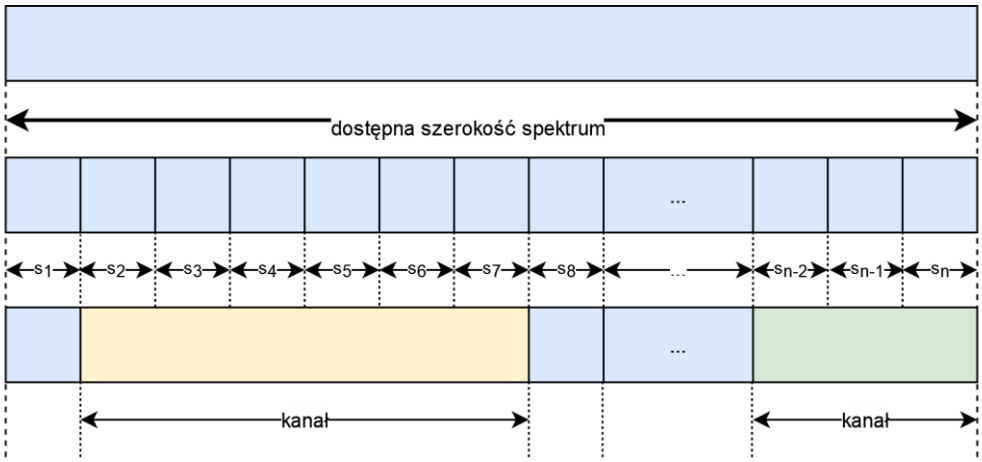
Początek rozległych sieci teleinformatycznych możemy datować na lata 60-te XX wieku, kiedy to amerykańska organizacja badawcza ARPA (ang. Advanced Research Group Agency) zaprojektowała i uruchomiła sieć ARPANET (ang. ARPA NETwork). Początkowo ARPANET była bardzo prostą siecią łączącą kilka komputerów i umożliwiającą wymianę plików z wynikami badań za pomocą transmisji pakietowej. Sieć ta bardzo szybko zaczęła się jednak rozrastać, zarówno pod względem liczby użytkowników jak również świadczonych usług, i dała początki globalnej sieci połączeń zwanej dzisiaj Internetem [1]. Obecnie mamy już do czynienia z sieciami dużo większymi i bardziej złożonymi, które dodatkowo stały się nieodzowną częścią naszego codziennego życia. Wspierają one szereg obszarów naszej aktywności – począwszy od pracy oraz edukacji, służby zdrowia, finansów, kończąc na rozrywce oraz życiu społecznym [2]. Niezwykle ważną rolę sieci w naszym życiu ujawniła również pandemia COVID-19, podczas której wiele kluczowych obszarów działalności mogło funkcjonować właśnie dzięki ich wsparciu – np. praca zdalna, nauka zdalna, telemedycyna [3].

Z racji swojej niezwykle ważnej roli oraz wciąż rosnącej popularności, sieci teleinformatyczne muszą się stale rozwijać, zarówno w kwestii wykorzystywanych architektur i technologii sieciowych, jak również w zakresie rozwiązań programowych wykorzystywanych do sterowania i zarządzania istniejącą infrastrukturą. W celu identyfikacji kluczowych kierunków rozwoju sieci oraz potrzebnych ulepszeń/innowacji, należy śledzić oraz analizować trendy na rynku sieci teleinformatycznych oraz opracowywane prognozy [2]. Aktualna analiza tych informacji pozwala zidentyfikować kilka szczególnie istotnych zjawisk, na które inżynierowie sieciowi muszą odpowiedzieć w najbliższej przyszłości. Przede wszystkim

zauważamy stale rosnącą liczbę użytkowników oraz ich tendencję do korzystania z zasobów sieci za pomocą wielu urządzeń – np. komputera w domu, komputera w pracy, tableta, smartfona, itd. Dodatkowo, większość ze wspomnianych urządzeń to sprzęt mobilny, połączony bezpośrednio z bezprzewodowymi sieciami dostępowymi. Firma Cisco szacuje, iż globalna liczba użytkowników sieciowych wzrośnie do 5.3 miliarda do roku 2023. Dla porównania, w roku 2018 liczba ta wynosiła 3.9 miliarda. Firma ta przewiduje dodatkowo, iż średnia liczba urządzeń (korzystających z sieci) przypadająca na jednego użytkownika osiągnie wartość 3.6 do roku 2023. W roku 2018 ten sam parametr wynosił 2.4. Co więcej, Cisco szacuje że do roku 2023 aż 45% urządzeń korzystających z sieci będą stanowiły urządzenia mobilne podłączone do szerokopasmowych bezprzewodowych sieci dostępowych [2]. Warto również zwrócić uwagę na strukturę usług sieciowych pod względem ich popularności oraz częstotliwości korzystania z nich przez użytkowników – dominują tutaj rozwiązania chmurowe (które udostępniają zasoby pamięciowe, obliczeniowe i sprzętowe), komunikatory internetowe, telefonia internetowa, telekonferencje oraz dystrybucja treści (np. muzyki, filmów, oprogramowania). Większość z wymienionych usług charakteryzuje się wysokimi wymaganiami przepustowościowymi, a do ich realizacji niezbędne są centra danych. Należy tutaj zauważyć, iż wciąż rosnąca liczba użytkowników sieciowych, urządzeń przez nich wykorzystywanych do łączności oraz zainteresowanie usługami wymagającymi dużych przepustowości, skutkują rosnącymi wartościami ruchu sieciowego przesyłanego przede wszystkim w sieciach rozległych (gdzie agregowany jest ruch od wielu użytkowników). Firma Cisco szacuje, iż ruch dostępowy na jednego użytkownika globalnej sieci zwiększy się z 45.9 Mbps do 110.4 Mbps pomiędzy rokiem 2018 i 2023 [2]. Ostatnim istotnym trendem wpływającym na rozwój sieci jest konieczność podwyższania ich bezpieczeństwa i zapewnienia nieprzerwanej dostępności. Ze względu na swoją rosnącą popularność oraz wsparcie niesione dla wielu dziedzin naszego życia, infrastruktura sieciowa oraz przetwarzane w niej dane mogą stać się celem przeróżnych ataków. Ataki mogą mieć na celu m. in. pogorszenie jakości świadczonych usług lub też przerwanie ich świadczenia [4]. Dodatkowo, każda sieć składa się z urządzeń oraz mediów transmisyjnych podatnych na awarie, których skutki również wpływają na jakość i dostępność usług. Stąd też, konieczne jest takie projektowanie i optymalizowanie sieci, aby zminimalizować prawdopodobieństwo urzeczywistnienia się tych zdarzeń oraz ich negatywne skutki (w przypadku wystąpienia) [5].

Odpowiedzią na konieczność obsłużenia ogromnych oraz wciąż rosnących wartości ruchu sieciowego są nowe technologie i architektury sieciowe. W przypadku optycznych sieci transportowych, które są głównie wykorzystywane do transmisji tak wielkich przepływności na duże odległości, aktualnie wykorzystywana jest technika zwielokrotnienia w dziedzinie długości fali (ang. wavelength division multiplexing, WDM). W technologii WDM cała szerokość spektrum dostępna w łączu światłowodowym dzielona jest na kanały o szerokości

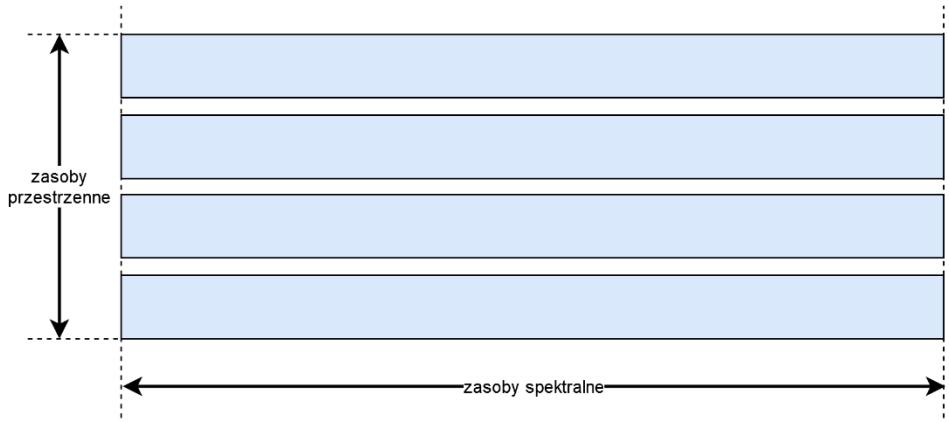
50 GHz, z których każdy scharakteryzowany jest przez inną centralną długość fali. Realizowane w sieci żądania ruchu przydzielane są więc do jednego z dostępnych kanałów, bez względu na ich wielkość [6]. Proces ten okazuje się nieefektywny, w szczególności dla żądań o zróżnicowanej wielkości. W celu lepszego wykorzystania zasobów spektralnych oraz obsługi rosnącego ruchu sieciowego, zaproponowano architekturę elastycznych sieci optycznych (ang. elastic optical network, EON). Wstępna analiza tego rozwiązania wykazała wysoką efektywność, stąd technologia ta jest stopniowo implementowana w rzeczywistych sieciach oraz jest uważana za przyszłość optycznych sieci transportowych. Swoją skuteczność architektura ta zawdzięcza elastycznemu sposobowi przydziału zasobów częstotliwościowych oraz wsparciu zaawansowanych modulacji i metod transmisji. W sieciach EON cała dostępna szerokość spektrum dzielona jest na sloty o szerokości 6.25 lub 12.5 GHz. Następnie, sąsiednie sloty mogą zostać zgrupowane w kanały, których rozmiar można dostosować do wymagań żądań ruchu. Mechanizm ten pozwala na efektywne wykorzystanie zasobów spektralnych, w szczególności w przypadku żądań ruchu o zróżnicowanej wielkości [7]. Główna idea elastycznych sieci optycznych (tj. podział dostępnego spektrum na sloty oraz tworzenie kanałów poprzez grupowanie sąsiednich slotów) została przedstawiona na Rys. 1.



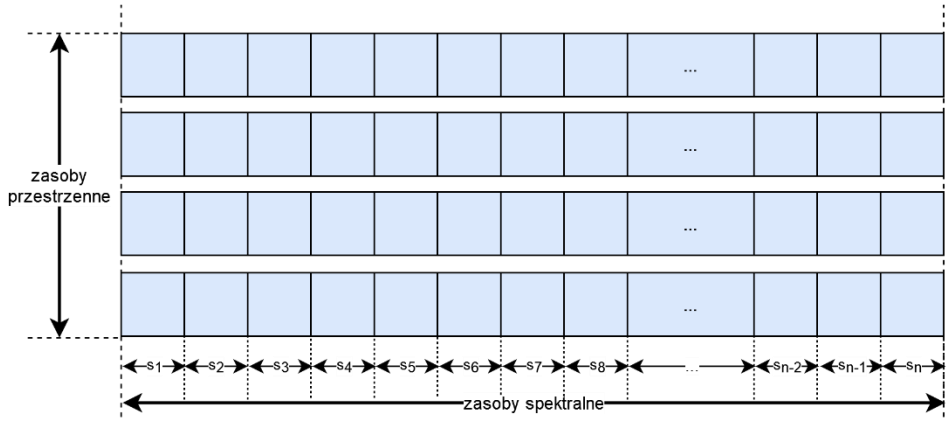
Rys. 1 Zarządzanie spektrum w elastycznych sieciach optycznych: podział spektrum na sloty (indeksowane s_1, s_2, …, s_n) oraz ich grupowanie w kanały

Pomimo swoich wielu zalet, elastyczne sieci optyczne nie rozwiązują jednak całkowicie problemu alokacji ruchu o coraz większych przepływnościach. Aby jeszcze bardziej zwiększyć przepustowości łącz sieciowych, zaproponowano technologię zwielokrotnienia przestrzennego (ang. spatial division multiplexing, SDM). W rozwiązaniu tym każde fizyczne łącze sieci składa się z wielu zasobów przestrzennych (które mogą być realizowane jako np. mody, rdzenie, kable światłowodowe), z których każdy oferuje taki sam zakres częstotliwości do transmisji. Podział zasobów spektralnych na każdym z dostępnych zasobów przestrzennych może odbywać się wg reguł technologii WDM lub EON [8]. Główna idea sieci ze zwielokrotnieniem przestrzennym została zobrazowana na Rys. 2 – współistnienie zasobów przestrzennych i spektralnych.

Dodatkowo, Rys. 3 obrazuje przykładowe zorganizowanie dostępnych zasobów spektralnych wg reguł EON.



Rys. 2 Idea sieci ze zwielokrotnieniem przestrzennym



Rys. 3 Sieci ze zwielokrotnieniem przestrzennym z organizacją spektrum wg zasad EON

W celu efektywnej realizacji szeregu zróżnicowanych oraz obciążających (pod względem przepustowości) usług sieciowych, wykorzystywane są przede wszystkim architektury sieci z centrami danych. Centra danych to węzły zaopatrzone w ogromną ilość zasobów pamięciowych, obliczeniowych, sieciowych i pożądanych przez użytkowników treści (np. biblioteki filmów). Dzięki tym zasobom są one w stanie realizować najpopularniejsze dziś usługi związane z przetwarzaniem w chmurach i dystrybucją treści. Sama architektura z centrami danych musi zostać jednak dobrze skonfigurowana poprzez m. in. odpowiednią lokalizację centrów danych oraz ich synchronizację/replikację [9]. Dodatkowo, w przypadku usług związanych z centrami danych nieefektywna okazuje się typowa transmisja unicast, a odpowiedzią na ten problem jest wykorzystanie technik anycast oraz multicast [10], [11]. W przypadku ruchu anycast mamy do czynienia ze schematem przesyłu jeden-do-jednego z wielu. Czyli jeden klient może zostać obsłużony przez dowolny z dostępnej grupy węzłów (tj. centrów danych). Ruch multicast jest natomiast przesyłem tej samej treści od jednego źródła do grupy odbiorców (transmisja jeden-do-wielu).

W przypadku ochrony sieci przed skutkami awarii i ataków, z pomocą przychodzą metody zapewnienia przeżywalności [5]. Metody te dzielimy na protekcję (ochronę przepływów) oraz restorację (odzyskiwanie przepływów). Protekcja to działania realizowane na etapie projektowania sieci. Kosztem dodatkowych zasobów sieciowych, pozwalają odzyskać 100% przepływów w bardzo krótkim czasie dla określonego schematu awarii/ataku (np. awaria pojedynczego łącza). Restoracja to natomiast rozwiązanie wdrażane po wystąpieniu awarii/ataku. Polega ono na identyfikacji przepływów, które nie są realizowane ze względu na zaistniały incydent, oraz próbie wyznaczenia dla nich nowych reguł routingu biorąc pod uwagę aktualną dostępność zasobów sieciowych. Restoracja nie wymaga więc żadnych dodatkowych prac i nakładów na etapie projektowania sieci, jednak nie gwarantuje odzyskania 100% danych. W przypadku metod protekcji, największą efektywność i popularność wykazują metody oparte na ścieżkach zapasowych, w tym dedykowana protekcja ścieżek (ang. dedicated path protection, DPP) oraz współdzielona protekcja ścieżek (ang. shared backup path protection, SBPP). W sieciach optycznych realizacja każdego żądania wymaga wyznaczenia tzw. ścieżki optycznej, czyli połączenia ścieżki routingu oraz kanału (zakresu częstotliwości). Metoda DPP zakłada wyznaczenie dla każdego żądania podstawowej oraz zapasowej ścieżki optycznej, przy czym zasoby każdej z nich są dedykowane dla danego żądania. Schemat SBPP również wymaga wyznaczenia dla każdego żądania podstawowej i zapasowej ścieżki optycznej, przy czym żądania których podstawowe ścieżki są rozłączne mogą współdzielić zasoby spektralne na ścieżkach zapasowych. Aby ochronić sieć przed określonym schematem awarii/ataku, wyznaczona ścieżka podstawowa i zapasowa muszą być ze sobą rozłączne. Charakter tej rozłączności zależy od adresowanego schematu awarii/ataku. Np. w celu ochrony przed skutkami awarii pojedynczego łącza w sieci, dla każdego żądania należy wyznaczyć dwie krawędziowo-rozłączne ścieżki. W celu zapewnienia wyższej ochrony sieci lub ochrony przed bardziej złożonymi awariami/atakami (obejmującymi więcej elementów sieciowych jednocześnie), można zastosować alokację wielościeżkową, gdzie dla każdego żądania wyznacza się przynajmniej dwie ścieżki zapasowe [4], [5], [6].

Nowe technologie i architektury sieciowe pozwalają efektywniej wykorzystywać zasoby sieci oraz sprostać rosnącym oczekiwaniom użytkowników końcowych. Jednak stosowane w nich nowoczesne rozwiązania przynoszą szereg nieznanych wcześniej problemów optymalizacyjnych, które muszą zostać rozwiązane przy projektowaniu oraz optymalizacji sieci implementujących te unowocześnienia. Wymagane są więc dedykowane oraz wysoce efektywne algorytmy rozwiązywania tych problemów [12], przy czym efektywność algorytmów rozumiana jest jako możliwość znajdowania rozwiązań optymalnych lub jak najbliższych optimum z wykorzystaniem jak najmniejszej ilości zasobów czasowych i obliczeniowych (tj. procesor i pamięć komputerowa). Ponieważ znalezienie rozwiązania optymalnego lub bardzo mu bliskiego jest zazwyczaj zadaniem niezwykle trudnym, wybór

metody rozwiązania problemu optymalizacyjnego jest kompromisem pomiędzy jakością rozwiązania (a co za tym idzie – efektywnością działania sieci) oraz zasobami obliczeniowymi (tj. sprzętem obliczeniowym i czasem obliczeń) wymaganymi do jego odnalezienia. Celem umożliwienia rozwiązywania dowolnego przypadku testowego oraz osiągnięcia zadowalającego kompromisu, niezbędne są algorytmy różnego typu – algorytmy dokładnie, metody dekompozycji, algorytmy heurystyczne oraz metaheurystyczne.

Przedstawiona analiza aktualnych trendów w dziedzinie sieci teleinformatycznych pozwoliła zidentyfikować kluczowe kierunki rozwoju sieci. Są to – unowocześnienia oraz propozycje nowych technologii i architektur sieciowych jak również dedykowane rozwiązania algorytmiczne, pozwalające efektywnie: (*i*) obsłużyć rosnącą liczbę użytkowników i urządzeń sieciowych, (*ii*) obsłużyć rosnący ruch sieciowy, (*iii*) obsłużyć usługi związane z centrami danych, (*iv*) zapewnić ciągłość pracy sieci, (*v*) zapewnić bezpieczeństwo oraz (*vi*) zapewnić dostępność jej zasobów.

4.3 Opis uzyskanych wyników oraz ich istotności/przydatności przy projektowaniu i optymalizacji rzeczywistych sieci teleinformatycznych

Prace wchodzące w skład prezentowanego osiągnięcia naukowego są odpowiedzią na zidentyfikowane aktualne trendy oraz potrzeby rozwoju badań związanych z sieciami teleinformatycznymi (Rozdział 4.2 niniejszego dokumentu). Każda z prac proponuje szereg modeli i algorytmów pozwalających projektować i optymalizować nowoczesne sieci teleinformatyczne z uwzględnieniem ich ochrony przed skutkami nieuniknionych awarii i ataków. Dodatkowo, w pracach prezentowane są wyniki i wnioski z badań symulacyjnych, przeprowadzonych celem weryfikacji efektywności zaproponowanych narzędzi optymalizacyjnych oraz zbadania efektywności przeżywalnych transportowych sieci optycznych w różnych konfiguracjach.

W niniejszym rozdziale omówię w sposób szczegółowy osiągnięcia oraz wyniki każdej pracy z cyklu publikacji biorąc pod uwagę (w przypadku prac wieloautorskich) tylko swój wkład własny. Prace omawiane są z zachowaniem ciągu przyczynowo-skutkowego prowadzonych w nich badań, co nie pokrywa się z chronologią ich opublikowania.

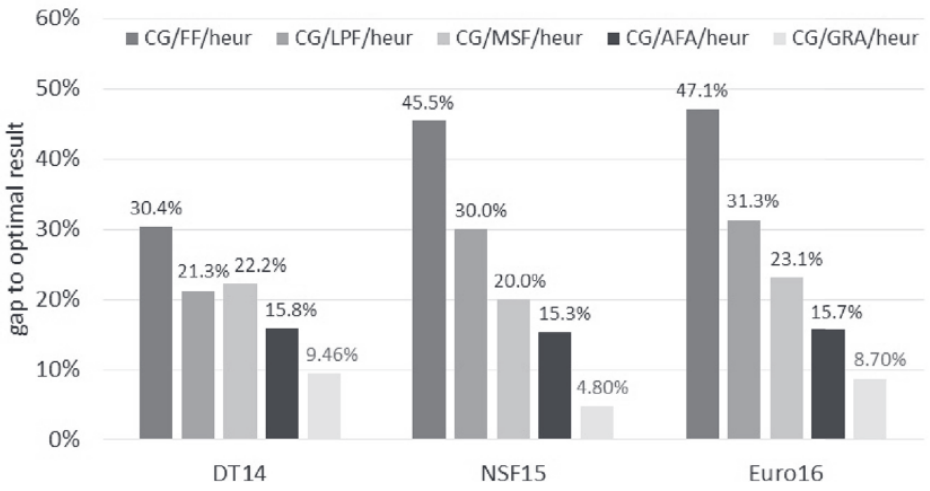
[O1] R. Goścień, M. Kucharzak, „On the efficient optimization of unicast, anycast and multicast flows in survivable elastic optical networks", Optical Switching and Networking 31, pp. 114-126, 2019.

Poruszany problem optymalizacyjny	• Jednoczesna optymalizacja przepływów unicast, anycast i multicast w sieciach EON z ochroną DPP oraz przy minimalizacji wykorzystania spektrum w sieci.
Zaproponowane narzędzia optymalizacyjne	• Model matematyczny oparty o technikę programowania liniowego całkowitoliczbowego (metoda dokładna). • Metoda dekompozycji bazująca na technice generacji kolumn (CG). • Algorytmy wspomagające metodę CG: algorytm dokładny i heurystyczny wyliczający rozwiązanie końcowe dla zredukowanego zbioru kolumn. • Referencyjny algorytm heurystyczny – AFA. • Adaptacje referencyjnych algorytmów heurystycznych – FF, LPF, MSF.

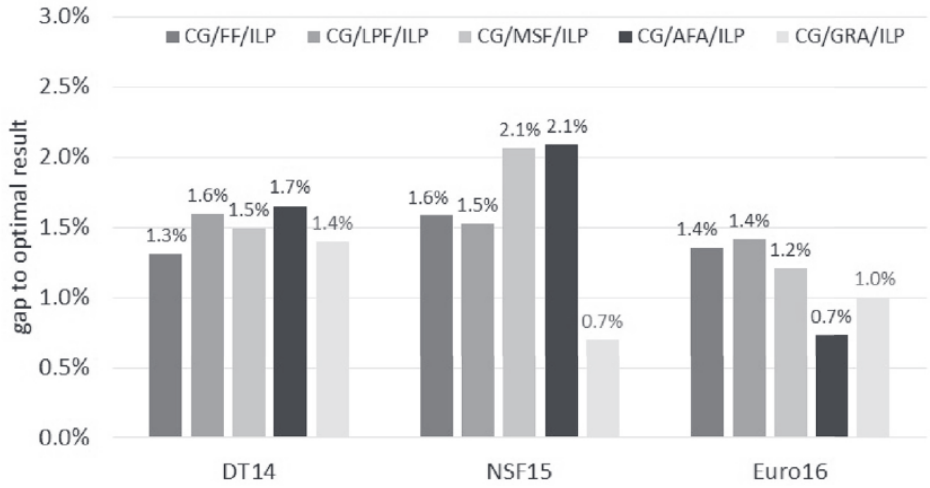
Cele badań symulacyjnych	• Zbadanie efektywności zaproponowanej metody CG:
	  o w zależności od metody wyliczającej rozwiązanie końcowe,
	  o na tle algorytmów referencyjnych,
	  o dla różnych profili ruchu sieciowego (proporcji trzech typów przepływów).

Swoje badania w tematyce modelowania i projektowania przeżywalnych transportowych sieci optycznych rozpoczęłam od obiecującej technologii EON. W pracy [O1] skupiłam się na architekturze sieci z centrami danych, trzech typach przepływów jednocześnie (unicast, anycast i multicast) oraz na zapewnieniu ochrony sieci przed skutkami awarii dowolnego łącza. W pracy zdefiniowałam problem jednoczesnej optymalizacji trzech typów przepływów sieciowych w elastycznych sieciach optycznych z uwzględnieniem dedykowanej protekcji ścieżek oraz przy minimalizacji wykorzystania spektrum w sieci. Dla rozważanego problemu zaproponowałam model matematyczny programowania liniowego całkowitoliczbowego (ang. integer linear programming, ILP). Model ten zaimplementowałam oraz zintegrowałam z oprogramowaniem IBM CPLEX, tworząc metodę dokładną rozwiązania problemu. Następnie, opracowałam również algorytm dekompozycji bazujący na technice generacji kolumn (ang. column generation, CG). Operuje on na modelu matematycznym problemu, na którym dokonuje procesu redukcji w celu ograniczenia liczby ścieżek

kandydujących dla żądań. Aby uzyskać wysoką efektywność metody CG, przebadałam wiele jej konfiguracji. Do najważniejszych zbadanych zagadnień należą: (*i*) efektywny sposób modelowania ruchu anycast (tj. sposob wyznaczania kandydujących ścieżek optycznych dla żądań powiązanych – w górę i w dół) w metodzie CG [13], (*ii*) algorytm wykorzystywany do znajdowania początkowego zbioru kolumn dla metody CG [14], (*iii*) algorytm znajdujący rozwiązanie docelowe dla zredukowanego zbioru kolumn wyliczonego przez metodę CG. Na potrzeby rozważania wielu wersji metody wprowadziłam notację *CG/init/end*, która wskazuje na metodę generacji kolumn współpracującą z algorytmem *init* do znajdowania rozwiązania początkowego oraz metodą *end* to znajdowania rozwiązania docelowego. W pracy [O1] szczególny nacisk położyłam właśnie na ostatni aspekt – opracowanie efektywnego algorytmu znajdującego rozwiązanie docelowe dla zredukowanego zbioru ścieżek optycznych (metoda *end*). Dla tego zadania zaproponowałam dwie metody – dokładną *ILP* (bazującą na modelu matematycznym nowego problemu) oraz dedykowaną heurystykę *heur*. Następnie, na podstawie obszernych badań symulacyjnych dokonałam strojenia zaproponowanych algorytmów (tj. doboru odpowiednich wartości parametrów), weryfikacji efektywności metody CG dla trzech rzeczywistych topologii sieciowych (PL12, NSF15, Euro16) oraz różnych konfiguracji ruchu w sieci (tj. proporcji ruchu unicast, anycast i multicast). W przypadku metody CG/init/ILP, uzyskałam wyniki bardzo bliskie optymalnym (średni błąd (tj. odległość od optimum) nieprzekraczający 2.1%) niezależnie od metody wyliczającej początkowy zbiór kolumn. W przypadku metody CG/init/heur, jakość rozwiązania docelowego jest mocno związania z jakością algorytmu wyliczającego początkowy zbiór kolumn. Dla najlepszego algorytmu, uzyskałam średnie błędy <10%. Warto jednak dodać, iż obliczenia metody CG/init/ILP trwają kilka razy dłużej niż obliczenia CG/init/heur. Uzyskany czas obliczeń metody CG był jednak zawsze kilkakrotnie krótszy niż czas obliczeń metody dokładnej. Stąd też, wyniki badań wykazały iż metoda CG jest w stanie uzyskać wyniki bardzo bliskie optymalnym, a jednocześnie charakteryzuje się dużo wyższą skalowalnością niż metoda dokładna. Przykładowe wyniki prezentujące efektywność zaproponowanego algorytmu zostały zaprezentowane na Rys. 4.



(a) CG/init/heur



(b) CG/init/ILP

Rys. 4 Porównanie efektywności metody CG/init/end: średnia odległość od optimum na podstawie [O1]

[O2] R. Goścień, M. Lozano, „Artificial Bee Colony for optimization of cloud-ready and survivable elastic optical networks", Computer Communications 128, pp. 35-45, 2018.

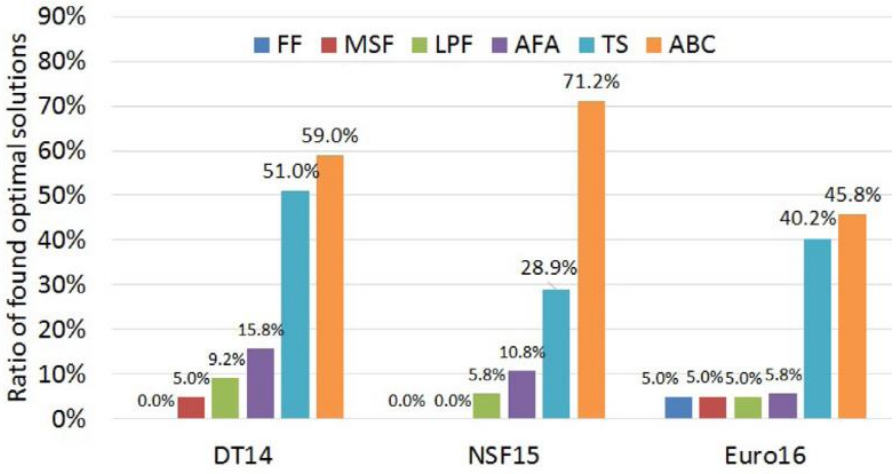
Poruszany problem optymalizacyjny	• Jednoczesna optymalizacja przepływów unicast, anycast i multicast w sieciach EON z ochroną DPP oraz przy minimalizacji wykorzystania spektrum.
Zaproponowane narzędzia optymalizacyjne	• Model matematyczny oparty o technikę programowania liniowego całkowitoliczbowego (metoda dokładna). • Algorytm metaheurystyczny sztucznej kolonii pszczół – ABC. • Referencyjny algorytm metaheurystyczny Tabu Search. • Referencyjny algorytm heurystyczny – AFA.

	• Adaptacje referencyjnych algorytmów heurystycznych – FF, LPF, MSF.

Cele badań symulacyjnych	• Dokonanie strojenia algorytmu ABC.
	• Zbadanie efektywności zaproponowanej metody ABC:
	  o na tle algorytmów referencyjnych,
	  o dla różnych konfiguracji sieciowych (profili ruchu sieciowego (tj. proporcji trzech typów przepływów), liczby kandydujących struktur routingu, liczby centrów danych).

W pracy [O1] rozważyłam problem jednoczesnej optymalizacji trzech typów przepływów w elastycznych sieciach optycznych z dedykowaną protekcją ścieżek. Do rozwiązania tego zadania, zaproponowałam metodę dokładną oraz metodę generacji kolumn. Ze względu na dużą złożoność obliczeniową, metody te można jednak zastosować do małych-średnich przypadków testowych, które najczęściej nie odpowiadają warunkom spotykanym w rzeczywistych sieciach. W artykule [O2] rozszerzyłam rozważania rozpoczęte w [O1] poprzez propozycję algorytmu metaheurystycznego o niezwykle wysokiej efektywności i skalowalności, celem rozwiązywania przypadków testowych dowolnej wielkości. W pracy wykorzystałam niezwykle popularną oraz coraz szybciej rozwijającą się dziedzinę algorytmów optymalizacji inspirowanych naturą [15], spośród której wybrałam algorytm sztucznej kolonii pszczół (ang. artificial bee colony, ABC) [16]. Idea tego algorytmu naśladuje rój pszczół poszukujący źródeł pokarmu. W roju pszczół istnieją osobniki o różnych funkcjach, które poszukiwania pokarmu prowadzą w innych obszarach i według innych zasad. Dodatkowo, pszczoły z jednego roju wymieniają się między sobą informacjami o odnalezionych atrakcyjnych i nieatrakcyjnych (pod względem ilości pokarmu) obszarach przestrzeni poszukiwań. Zaproponowany przeze mnie algorytm optymalizacyjny naśladuje właśnie taką inteligencję rojową. Wykorzystuje on wielu agentów poszukiwań, którzy jednocześnie przeszukują przestrzeń rozwiązań i wymieniają między sobą informacje o jej atrakcyjnych i nieatrakcyjnych obszarach. Dodatkowo, agenci dzielą się na trzy grupy, z których każda ma zdefiniowane inne mechanizmy przeszukiwania. Pozwala to w elastyczny sposób wykorzystywać mechanizmy intensyfikacji i dywersyfikacji przestrzeni rozwiązań. W ramach prac nad [O2] omawiany algorytm ABC zaimplementowałam, przeprowadziłam jego strojenie oraz porównałam z wcześniej zaproponowanymi metodami. Badania przeprowadziłam na trzech rzeczywistych topologiach sieciowych – DT14, NSF15, Euro16. Uzyskane wyniki oraz ich analiza statystyczna wykazały wysoką skuteczność metody ABC. Dla badanych scenariuszy, algorytm ten uzyskał wyniki bliskie optymalnym (średni błąd wynosił od 3.3% (dla NSF15) do 9.3% (dla DT14)) oraz zauważalnie lepsze niż wcześniejsze algorytmy (średni

błąd niższy aż do 2 punktów procentowych od najlepszego z pozostałych algorytmów). Dodatkowo, stosunkowo krótki czas obliczeń pojedynczej iteracji i możliwość kontrolowania liczby iteracji algorytmu sprawiają iż jest on niezwykle skalowalny oraz może zostać zastosowany do dowolnego przypadku testowego problemu. Przykładowe wyniki potwierdzające wysoką efektywność metody ABC pokazano na Rys. 5, gdzie wskazany jest procent znalezionych rozwiązań optymalnych przez algorytm ABC oraz metody referencyjne (FF, MSF, LPF, AFA – heurystyki, TS (Tabu Search) – metaheurystyka).



Rys. 5 Efektywność algorytmu ABC na tle metod referencyjnych: liczba odnalezionych rozwiązań optymalnych na podstawie [O2]

[O3] R. Goścień, K. Walkowiak, „Modeling and optimization of data center location and routing and spectrum allocation in survivable elastic optical networks", Optical Switching and Networking 23, pp. 129-143, 2017.

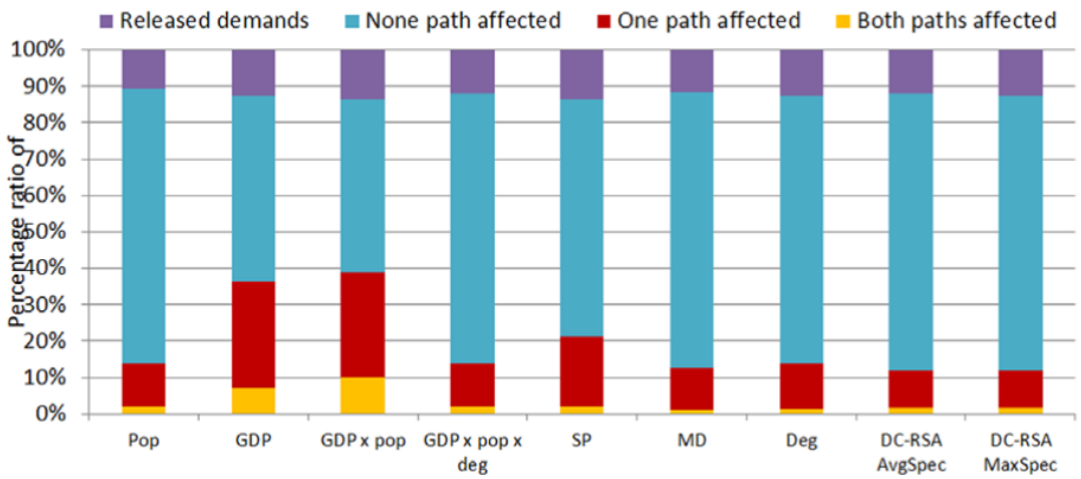
Poruszany problem optymalizacyjny	• Wyznaczenie lokalizacji centrów danych oraz jednoczesna optymalizacja przepływów unicast i anycast w sieciach EON z ochroną DPP oraz przy minimalizacji wykorzystania spektrum.
Zaproponowane narzędzia optymalizacyjne	• Modele matematyczne oparte o technikę programowania liniowego całkowitoliczbowego (metody dokładne). • Dedykowane algorytmy heurystyczne – AFA, Heur-DC-RSA. • Metody rozmieszczania centrów danych – Pop, GDP, GDP-Pop, GDP-Pop-Deg, MD, SP, Deg. • Adaptacja referencyjnego algorytmu heurystycznego – FF.

Cele badań symulacyjnych	• Strojenie zaproponowanych metod.
	• Zbadanie efektywności zaproponowanych metod:
	  o na tle metody referencyjnej,
	  o w zależności od konfiguracji sieci (liczby centrów danych, struktury ruchu sieciowego (proporcji pomiędzy przepływami trzech typów)).
	• Zbadanie wpływu różnych metod rozwiązania problemu (w szczególności – różnych metod rozlokowania centrów danych) na:
	  o wykorzystanie spektrum w sieci,
	  o przeżywalność sieci (mierzoną ilością traconego ruchu w przypadku losowej awarii/ataku dużej skali).

Analizując aktualne trendy dotyczące sieci teleinformatycznych zauważamy ogromną oraz cały czas rosnącą popularność usług związanych z centrami danych. Warto jednak nadmienić, iż realizacja takich usług wymaga rozwiązania wielu dodatkowych problemów przez operatorów telekomunikacyjnych (poza omawianymi już zadaniami wyznaczania routingu oraz przydziału zasobów sieciowych). Jednym z takich problemów jest zagadnienie wyznaczenia lokalizacji centrów danych w sieci [17], [18]. Ich odpowiedni wybór przełoży się bowiem na wiele istotnych parametrów takich jak np. liczba obsłużonych klientów, jakość świadczonych im usług, wykorzystanie posiadanych zasobów, przeżywalność sieci.

W pracy [O3] rozszerzyłam swoje poprzednie rozważania o ten istotny aspekt i skupiłam się na problemie wyznaczenia lokalizacji centrów danych oraz jednoczesnej optymalizacji przepływów unicast i anycast w sieciach EON implementujących metodę DPP. Problem ten analizowałam dla dwóch funkcji celu związanych z wykorzystaniem zasobów sieci – średniego oraz maksymalnego wykorzystania spektrum. Poruszany problem optymalizacyjny sformułowałam za pomocą modelu matematycznego programowania liniowego całkowitoliczbowego. Model ten zaimplementowałam oraz zintegrowałam ze środowiskiem IBM CPLEX, w celu stworzenia metody dokładnej. Następnie, do rozwiązywania dowolnie dużych scenariuszy testowych, zaprojektowałam oraz zaimplementowałam dedykowany algorytm heurystyczny Heur-DC-RSA. Ponieważ zadanie optymalizacyjne okazało się niezwykle trudne (łączy w sobie trzy podzadania optymalizacyjne – lokalizację centrów danych, wyznaczenie reguł routingu oraz wyznaczanie zasobów spektralnych), zaproponowałam również jego rozwiązywanie poprzez dekompozycję na dwa następującego po sobie podzadania: (*i*) rozmieszczenie centrów danych oraz (*ii*) wyznaczanie reguł routingu oraz

zasobów spektralnych. Do umiejscawiania centrów danych wprowadziłam siedem metod bazujących na parametrach topologicznych sieci, parametrach ekonomicznych miast odpowiadających jej węzłom oraz kombinacji obu wcześniejszych kryteriów. Problem wyznaczenia reguł routingu oraz przydziału zasobów spektralnych dla znanej lokalizacji centrów danych opisałam modelem matematycznym programowania liniowego całkowitoliczbowego. Zaprojektowałam i zaimplementowałam również dla niego metodę heurystyczną. Następnie, przeprowadziłam obszerne badania symulacyjne mające na celu strojenie oraz zbadanie efektywności zaproponowanych metod (pod względem wpływu na wykorzystanie spektrum i przeżywalność sieci) jak również sformułowania rekomendacji dotyczących efektywnego umiejscawiania centrów danych w przykładowych topologiach sieciowych. W badaniach wykorzystałam trzy realistyczne topologie – DT14 (do zbadania małych scenariuszy i testowania modeli matematycznych), US26 i Euro28 (do zbadania dużych scenariuszy testowych przy użyciu algorytmów heurystycznych). Biorąc pod uwagę duże scenariusze i kryterium wykorzystania spektrum, dla US26 najlepsza okazała się metoda Heur-DC-RSA, natomiast dla Euro28 dwie metody wykazały podobną (najlepszą) efektywność – Heur-DC-RSA oraz metoda dekompozycji połączona z procedurą lokalizacji centrów danych w węzłach o wysokim stopniu sąsiedztwa. Kryterium przeżywalności sieci weryfikowałam poprzez symulowanie losowych awarii/ataków (o różnej lokalizacji i różnym zasięgu) i sprawdzanie jak wpływają one na realizację żądań. A mianowicie, dla każdego żądania sprawdzałam następujące warunki: (*i*) czy żądanie zostało utracone z powodu awarii węzła początkowego lub końcowego, (*ii*) czy żądanie zostało utracone z powodu awarii obu wyznaczonych ścieżek, (*iii*) czy obie ścieżki wyznaczone dla żądania wciąż działają, (*iv*) czy jedna z wyznaczonych ścieżek przestała działać. Przykładowe wyniki porównania zamieszczone są na Rys. 6 dla następujących algorytmów: metoda dekompozycji połączona z siedmioma procedurami wyznaczania lokalizacji centrów danych (bazującymi odpowiednio na: Pop – populacji miast-węzłów sieci; GDP – produkcie krajowym brutto miast-węzłów sieci; GDP-Pop – populacji i produkcie krajowym brutto miast-węzłów sieci; GDP-Pop-Deg – populacji, produkcie krajowym brutto oraz stopniach sąsiedztwa miast-węzłów sieci; SP – długości najkrótszej ścieżki do dowolnego innego węzła; MD – odległościach każdego klienta do najbliższego centrum danych; Deg – stopniu wierzchołków sieci) oraz metodzie łącznej (DC-RSA) zastosowanej z funkcją celu średniego (AvgSpec) i maksymalnego (MaxSpec) wykorzystania spektrum. Pod względem kryterium przeżywalności najsłabsze wyniki uzyskała metoda dekompozycji połączona z procedurami GDP oraz GDP-Pop. Efektywność pozostałych algorytmów plasowała się na podobnym poziomie biorąc pod uwagę realizację/odrzucenie żądań (należy zauważyć, iż przy ochronie DPP awaria jednej ze ścieżek nie powoduje przerwania realizacji żądania).



Rys. 6 Porównanie efektywności algorytmów wyznaczania lokalizacji centrów danych oraz alokacji żądań z uwzględnieniem metody DPP: przeżywalność sieci mierzona jako liczba żądań realizowanych/utraconych w przypadku losowej awarii/ataku na podstawie [O3]

[O4] R. Goścień, „On the Efficient Design of Network Resilient to Electro-Magnetic Pulse Attack - Elastic Optical Network Case Study", Computer Communications 179, pp. 272-284, 2021.

Poruszany problem optymalizacyjny	• Problem wyboru węzłów sieci do ochrony (przed promieniowaniem elektromagnetycznym o nadmiernej mocy) za pomocą bunkrów oraz jednoczesnej optymalizacji przepływów typu unicast w sieciach EON implementujących routing wielościeżkowy przy minimalizacji wykorzystania spektrum oraz podatności sieci na ataki z impulsem elektromagnetycznym.
Zaproponowane narzędzia optymalizacyjne	• Model matematyczny oparty o programowanie liniowe całkowitoliczbowe (metoda dokładna). • Metody wyznaczania węzłów do ochrony – Adaptive/Avg, Adaptive/Max, AvgNeighbour, MinNeighbour, NodalDegree. • Dedykowane algorytmy heurystyczne – 1S-RSA, 2S-RSA. • Adaptacje referencyjnych algorytmów heurystycznych – FF-RSA oraz LD-RSA.
Cele badań symulacyjnych	• Weryfikacja efektywności zaproponowanych narzędzi optymalizacyjnych: ○ na tle metod referencyjnych,

    - w zależności od konfiguracji sieci (w tym istotności dwóch kryteriów optymalizacyjnych) oraz zasięgu ataku.
- Analiza efektywności zaproponowanego schematu ochrony w zależności od:
    - liczby ścieżek wyznaczanych dla każdego żądania,
    - liczby dostępnych bunkrów,
    - metody wyznaczania węzłów do ochrony,
    - rozważanej topologii sieciowej,
    - zasięgu potencjalnego ataku.
- Analiza kosztu spektralnego (tj. wymaganych dodatkowych zasobów spektralnych) zaproponowanego schematu ochrony.
- Analiza podatności trzech rzeczywistych topologii sieciowych na ataki z impulsem elektromagnetycznym.

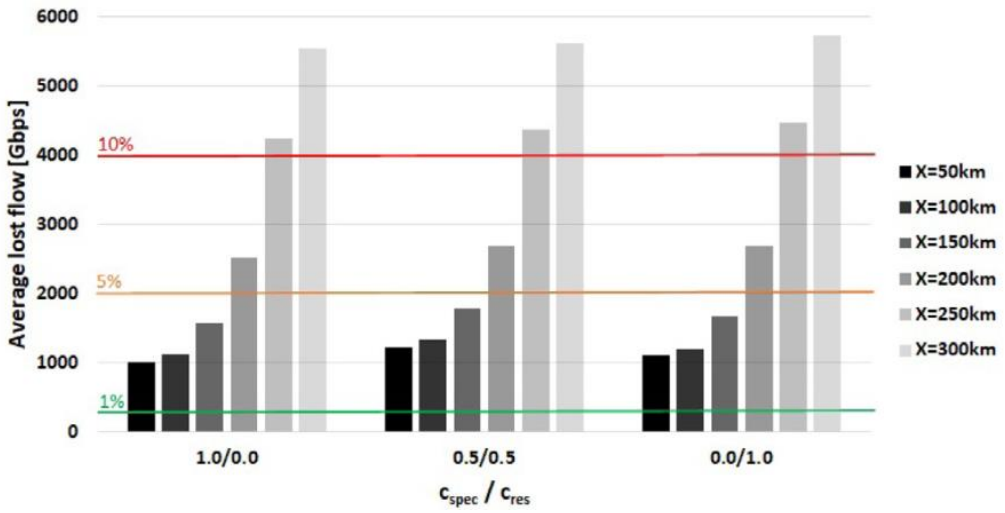
Międzynarodowe oraz światowe organizacje do spraw bezpieczeństwa ostrzegają przed rosnącą groźbą coraz to nowszych scenariuszy ataków, w tym groźbą ataku nuklearnego (za pomocą broni jądrowej) [19]. Podstawowym elementem takiego zagrożenia jest eksplozja ładunku radioaktywnego, niszcząca wszystko w zasięgu ataku. Rozmiar tego zasięgu zależy przede wszystkim od wielkości ładunku nuklearnego oraz wysokości (nad poziomem gruntu) detonacji. Co więcej, eksplozja ładunku nuklearnego generuje również impuls elektromagnetyczny (czyli impuls energii wielkiej mocy), który rozchodzi się dookoła obszaru ataku na dużo większe odległości (zwane zasięgiem zakłócającym). Obszar objęty impulsem elektromagnetycznym jest bardzo trudny do zdefiniowania, gdyż jego rozmiar i kształt zależą od wielu czynników (m. in. wielkości ładunku nuklearnego oraz wysokości detonacji, odległości od miejsca eksplozji, długości i szerokości geograficznej, warunków atmosferycznych, rodzaju i pokrycia terenu, zabudowy terenu, itd.). Impuls elektromagnetyczny jest niezwykle groźny dla wszelkich elementów, urządzeń oraz systemów elektronicznych, gdyż może doprowadzić do ich uszkodzenia lub niepoprawnego działania. Niestety, nie ma skutecznej metody ochrony przed destrukcyjnym skutkiem detonacji broni jądrowej. Jednak aktualny stan techniki pozwala zapewnić efektywną ochronę urządzeń i systemów elektronicznych przed impulsem elektromagnetycznym. Ochrona ta opiera się na zaawansowanych rozwiązaniach ekranowania elementów lub też całych urządzeń/systemów. W przypadku większych elementów/systemów, mówimy o wykorzystaniu tzw. bunkrów, czyli zbiorników/pomieszczeń odpornych na impuls elektromagnetycznych, i umieszczeniu w nich

wybranej infrastruktury. Pomimo wysokiej ochrony, wykorzystanie specjalistycznych bunkrów jest rozwiązaniem niezwykle drogim i najczęściej jest stosowane tylko dla kluczowych elementów [20].

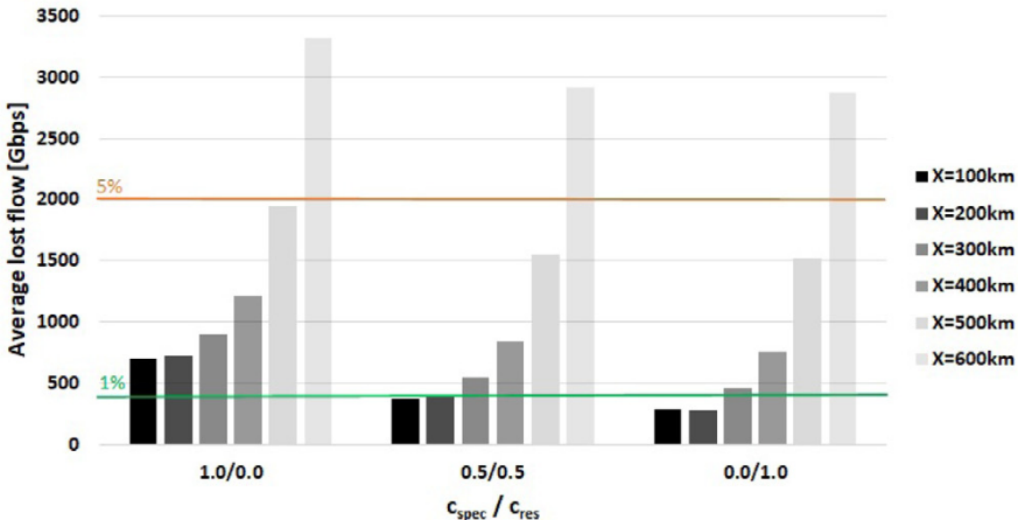
W artykułach [O1], [O2], [O3] skupiłam się na temacie ochrony sieci EON przed skutkami awarii dowolnego łącza w sieci. Jest to najczęściej spotykany scenariusz awarii w sieciach, stąd też istnieje wiele efektywnych metod ochrony przed nim [5]. Jednak jako kluczowa infrastruktura wspierająca naszą codzienną aktywność, zapewniająca komunikację oraz przetwarzająca ogromne ilości danych wrażliwych, sieci teleinformatyczne stały się również potencjalnym celem wielu groźniejszych scenariuszy ataków. Aby zapewnić bezpieczeństwo i niezawodność ich działania, należy te nowe scenariusze wziąć pod uwagę przy projektowaniu/optymalizacji sieci i zaproponować dedykowane metody ochrony. Praca [O4] jest odpowiedzią na rosnące prawdopodobieństwo urzeczywistnienia się ataków nuklearnych i ataków z impulsem elektromagnetycznym oraz wynikającą z tego potrzebą opracowania metod ochrony topologii i infrastruktury sieci teleinformacyjnych. Pragnę zaznaczyć, iż wg przeprowadzonego przeze mnie dogłębnego przeglądu literatury, [O4] jest to pierwsza i (na dzień pisania wniosku) jedyna praca poruszająca temat ochrony sieci teleinformatycznych przed tego typu atakami.

W pracy [O4] skupiłam się na temacie efektywnego projektowania sieci teleinformatycznej odpornej na ataki związane z impulsem elektromagnetycznym (jako następstwo ataku nuklearnego lub jako niezależny atak). Zaproponowałam schemat ochrony bazujący na wykorzystaniu dwóch elementów: (*i*) ochrony wybranych węzłów sieci (tj. infrastruktury tych węzłów) za pomocą bunkrów oraz (*ii*) routingu wielościeżkowego jako sposobu ochrony przepływów sieciowych. W artykule rozważyłam sieć teleinformatyczną implementującą technologię elastycznych sieci optycznych. Zdefiniowałam problem optymalizacyjny nazywany bunkers location routing and spectrum allocation (BLRSA), czyli problem wyboru węzłów do ochrony za pomocą bunkrów, wyznaczenia reguł routingu oraz przydziału zasobów spektralnych dla zbioru zdefiniowanych żądań. Funkcja celu w problemie łączy dwa bardzo istotne kryteria – wykorzystanie spektrum oraz poziom odporności sieci na ataki impulsem elektromagnetycznym (mierzony średnią ilością utraconych danych w przypadku wystąpienia losowego ataku tego typu). Zdefiniowany problem opisałam modelem matematycznym ILP, który następnie zaimplementowałam oraz zintegrowałam ze środowiskiem IBM CPLEX, celem uzyskania metody dokładnej. Aby umożliwić rozwiązywanie niezwykle dużych i rzeczywistych przypadków testowych, zaproponowałam również szereg dedykowanych metod heurystycznych, które dokonują dekompozycji problemu BLRSA na podproblemy. Tym samym, zaproponowałam pięć metod wyboru węzłów sieci, które powinny zostać objęte ochroną za pomocą bunkrów. Metody te bazują na parametrach topologicznych sieci oraz analizie scenariuszy potencjalnych ataków. Następnie,

zaprojektowałam dwa algorytmy heurystyczne, tj. 1S-RSA oraz 2S-RSA, celem rozwiązywania problemu routingu i przydziału zasobów spektralnych dla wyznaczonej lokalizacji węzłów chronionych przez bunkry. Algorytm 1S-RSA rozwiązuje oba zadania jednocześnie, natomiast 2S-RSA najpierw wyznacza reguły routingu po czym przydziela zasoby spektralne. W kolejnym kroku przeprowadziłam obszerne badania symulacyjne, podzielone na trzy części: (*i*) strojenie zaproponowanych metod, (*ii*) weryfikacja ich efektywności poprzez porównanie z metodami referencyjnymi, (*iii*) realistyczne studium przypadku. W ramach studium przypadku przeprowadziłam analizę korzyści oraz kosztów związanych z ochroną sieci przed atakami impulsem elektromagnetycznym oraz ocenę podatności trzech realistycznych topologii (PL12, DT14, Euro16) na tego typu ataki. Wyniki badań wykazały bardzo dużą skuteczność zaproponowanego schematu protekcji, który pozwala ochronić aż do 90% ruchu traconego w przypadku niezastosowania żadnej ochrony. Dodatkowo, możliwość wykorzystania różnej liczby ścieżek routingu oraz różnej liczby węzłów chronionych przez bunkry tworzy ten schemat niezwykle elastycznym oraz pozwalającym wdrożyć rozsądny kompromis pomiędzy efektywnością protekcji a jej kosztem (wynikającym z alokacji dodatkowych zasobów oraz implementacji bunkrów). Przykładowe wyniki badań, wizualizujące potencjalny wpływ ataku o różnym zasięgu zakłócającym na ilość utraconych danych, zostały przedstawione na Rys. 7. Wyniki badań wykazały, iż najbardziej podatne na tego typu ataki są sieci małe (np. krajowe – jak PL12), w których węzły położone są blisko siebie. W przypadku takich sieci, utraty danych są znaczące nawet przy stosunkowo niewielkich zasięgach zakłócających. W przypadku sieci większych (np. kontynentalnych – jak Euro16), ilość utraconych danych jest dużo mniejsza, nawet dla ataków o większym zasięgu.



(a) topologia PL12



(b) topologia Euro16

Rys. 7 Porównanie ochrony sieci przed skutkami impulsu elektromagnetycznego: średnia ilość utraconych danych jako funkcja zasięgu zakłócającego *X* oraz ustawień algorytmu optymalizacyjnego c_{spec}/c_{res} na podstawie [O4] (poziomie linie – zielona, pomarańczowa, czerwona – określają procent całościowego ruchu sieciowego)

[O5] R. Goścień, K. Walkowiak, „On the efficiency of survivable flex-grid SDM networks", Journal on Lightwave Technology 36(10), pp. 1815-1823, 2018.

Poruszany problem optymalizacyjny	• Problem optymalizacji przepływów typu unicast w sieciach EON/SDM przy minimalizacji wykorzystania spektrum. Problem rozważany z uwzględnieniem:
	  ○ różnych technik przełączania w sieciach SDM (tj. IndSw, JSw),
	  ○ różnych metod ochrony przepływów (tj. brak ochrony, DPP, SBPP),
	  ○ różnego stopnia ochrony przepływów (od 0% do 100% z krokiem co 10%).

Zaproponowane narzędzia optymalizacyjne	• Modele matematyczne oparte o programowanie liniowe całkowitoliczbowe (metody dokładne). • Dedykowany algorytm heurystyczny – SSA. • Adaptacja referencyjnego algorytmu heurystycznego – FF.
Cele badań symulacyjnych	• Weryfikacja efektywności algorytmu SSA: ○ na tle metod referencyjnych,

- w zależności od konfiguracji sieci (liczby zasobów przestrzennych, metody przełączania, metody ochrony przepływów, stopnia ochrony przepływów, profilu ruchu sieciowego).

- Analiza efektywności spektralnej dla przeżywalnej sieci EON/SDM w zależności od:
  - zastosowanej metody ochrony przepływów (brak ochrony, DPP, SBPP),
  - części przepływów objętych ochroną (0%-100%, z krokiem 10%),
  - zastosowanej metody przełączania zasobów przestrzennych (IndSw, JSw),
  - liczby zasobów przestrzennych,
  - profilu ruchu sieciowego.

Kolejny etap badań to poszerzenie tematyki przeżywalności transportowych sieci optycznych o technologię sieci ze zwielokrotnieniem przestrzennym, ze szczególnym uwzględnieniem jej cech specyficznych. Sieci SDM wprowadzają dodatkowy wymiar w rozważanych problemach – wymiar przestrzenny, czyli zbiór zasobów przestrzennych dostępnych na każdym fizycznym łączu sieci. Każdy z dostępnych zasobów oferuje ten sam zakres częstotliwości. W zależności od zastosowanego sposobu fizycznej realizacji, zasoby przestrzenne mogą być przełączane (w urządzeniach pośrednich) w jednym z trzech trybów – niezależnym (ang. independent switching, IndSw), łącznym (ang. joint switching, JSw) lub grupowym (ang. fractional switching, FracSw). W rozwiązaniu IndSw każdy zasób przestrzenny przełączany jest niezależnie. Umożliwia to tworzenie jedynie kanałów spektralnych, które grupują określoną liczbę slotów na jednym wybranym zasobie przestrzennym. W metodzie JSw wszystkie zasoby przestrzenne muszą być przełączane łącznie. Stąd też, możliwe jest tu tworzenie jedynie kanałów przestrzenno-spektralnych, które grupują określone sloty na wszystkich zasobach przestrzennych równocześnie. Rozwiązanie FracSw pozwala natomiast na tworzenie grup zasobów przestrzennych oraz przełączanie ich w tych grupach. Kanały dostępne w technice FracSw to kanały przestrzenno-spektralne, przy czym każdy z nich wykorzystuje tylko podzbiór wszystkich dostępnych zasobów przestrzennych. Omówione techniki przełączania różnią się między sobą złożonością oraz efektywnością wykorzystania zasobów. Im mniejszy rozmiar grupy przełączania, tym większa złożoność tego procesu i wspierających urządzeń sieciowych. Równocześnie, im mniejszy rozmiar grupy przełączania, tym lepsze wykorzystanie spektrum (ze względu na lepiej dopasowane kanały do wymagań żądań ruchu). Stąd też, w normalnych warunkach sieci, IndSw jest rozwiązaniem

najbardziej złożonym i równocześnie najefektywniej wykorzystującym spektrum, natomiast JSw jest metodą najprostszą w realizacji ale i najsłabiej wykorzystującą spektrum. FracSw plasuje się po środku w przypadku obu kryteriów [8].

W pracy [O5] poruszyłam problem efektywnej ochrony elastycznej sieci optycznej ze zwielokrotnieniem przestrzennym przed najpopularniejszym typem awarii w sieciach – awarią pojedynczego łącza. Co ważne, w artykule [O5] skupiłam się na zaadaptowaniu technik ochrony do cech charakterystycznych sieci SDM (czyli technik przełączania zasobów przestrzennych) oraz zbadaniu ich wpływu na efektywność i koszt ochrony sieci. W pracy rozważyłam dwie najpopularniejsze opcje przełączania – IndSw oraz JSw [8]. Do zapewnienia ochrony przepływów wykorzystałam dwie popularne metody bazujące na alokacji zapasowych ścieżek – dedykowaną protekcję ścieżek oraz współdzieloną protekcję ścieżek. Dodatkowo, każdą z tych metod przeanalizowałam w połączeniu z mechanizmem częściowej ochrony przepływów, gdzie współczynnik ochrony zmieniał się od 0% (co odpowiada sieci niechronionej) do 100% (co odpowiada pełnej ochronie przepływów) z krokiem 10% [21]. Rozważania przeprowadziłam dla funkcji celu zdefiniowanej jako wymagana szerokość spektrum. Formalnie, w pracy [O5] poruszyłam problem statycznej alokacji żądań unicast w przeżywalnej elastycznej sieci optycznej ze zwielokrotnieniem przestrzennym minimalizując wykorzystanie spektrum. Problem ten zdefiniowałam za pomocą zestawu modeli ILP z uwzględnieniem różnych metod zapewnienia przeżywalności (dedykowanej protekcji ścieżek, współdzielonej protekcji ścieżek, częściowej ochrony przepływów) oraz różnych technik przełączania zasobów przestrzennych (IndSw oraz JSw). Modele te zaimplementowałam oraz zintegrowałam ze środowiskiem IBM CPLEX celem stworzenia metody dokładnej rozwiązania problemu. Następnie zaprojektowałam i zaimplementowałam dedykowany algorytm heurystyczny (Spatial-Spectral Allocation – SSA), aby umożliwić szybkie rozwiązywanie rzeczywistych scenariuszy testowych.

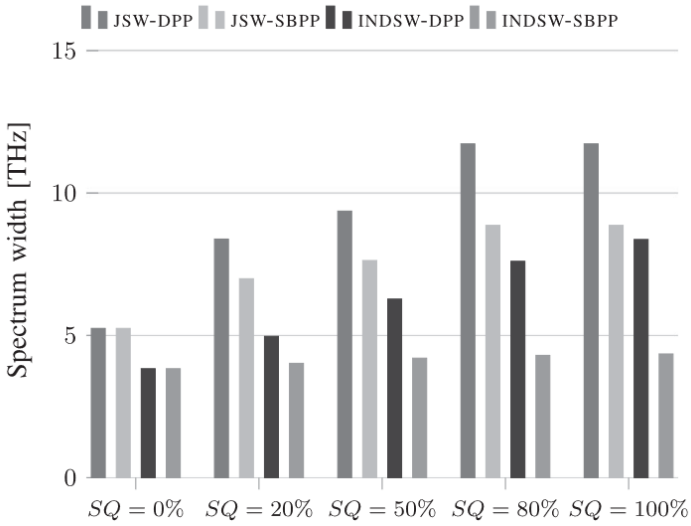
Opracowane metody wykorzystałam następnie do przeprowadzania obszernych badań symulacyjnych, skupiających się na następujących aspektach:

- weryfikacja efektywności zaproponowanego algorytmu heurystycznego (na podstawie porównania z metoda referencyjnymi),
- sprawdzenie efektywności przeżywalnej elastycznej sieci optycznej ze zwielokrotnieniem przestrzennym, a w szczególności weryfikacja efektywności w zależności od:
    - zastosowanej metody ochrony przepływów (brak ochrony, DPP, SBPP),
    - części przepływów objętych ochroną (0%-100%, z krokiem 10%),
    - zastosowanej metody przełączania zasobów przestrzennych (IndSw, JSw),
    - liczby zasobów przestrzennych,

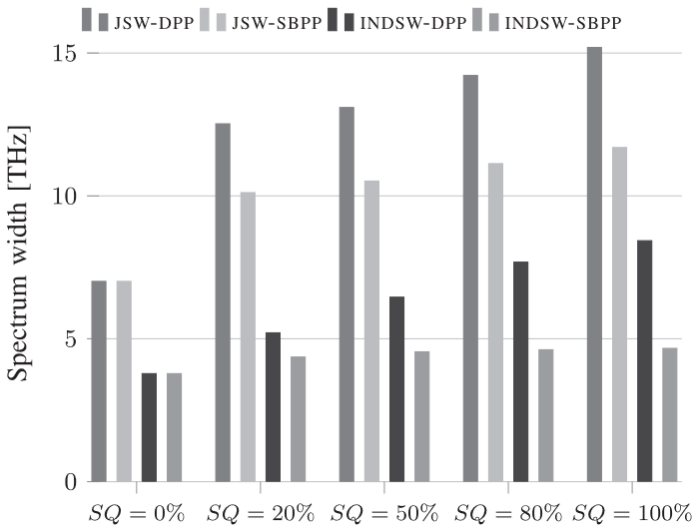
- profilu ruchu sieciowego (tj. liczby i średniej wielkość żądań ruchu: ruch jednorodny (wszystkie żądania tej samej wielości) oraz zróżnicowany (losowe wartości żądań) przy tej samej sumarycznej wartości żądań).

Warto podkreślić, iż w pracy rozważyłam dwa szczególne przypadki: (*i*) brak metody ochrony przepływów (celem zweryfikowania zysków i kosztów metod ochrony) oraz (*ii*) jeden dostępny zasób przestrzenny (celem porównania efektywności sieci ze zwielokrotnieniem przestrzennym z siecią nieimplementującą takiego mechanizmu).

Wyniki przeprowadzonych przeze mnie badań wykazały, iż oba schematy ochrony sieci wymagają dodatkowych zasobów spektralnych, co zostało zobrazowane na Rys. 8. W przebadanych scenariuszach dla całościowej ochrony ruchu sieć z protekcją dedykowaną zużywała ok. 120% więcej zasobów niż sieć niechroniona. W przypadku sieci z ochroną współdzieloną wymaganych było ok. 23% więcej zasobów przy przełączaniu niezależnym oraz ok. 70% przy przełączaniu łącznym. Objęcie ochroną jedynie części przepływów pociągało za sobą odpowiednie zmniejszenie wymagań na dodatkowe spektrum. Bardzo duży wpływ na wykorzystanie spektrum w sieci miała również zastosowana metoda przełączania oraz liczba dostępnych zasobów przestrzennych. W przebadanych scenariuszach metoda JSw zużywała ok. dwa razy więcej zasobów spektralnych niż IndSw. Dodatkowo, przy IndSw zastosowanie większej liczby zasobów przestrzennych pozwoliło w przybliżeniu liniowo zredukować wykorzystanie spektrum na pojedynczym zasobie. W przypadku drugiej techniki przełączania również odnotowałam redukcję wykorzystania spektrum na pojedynczym zasobie przy zwiększaniu liczby zasobów, jednak nie była to zależność liniowa, a zyski były dużo mniejsze (niż przy pierwszej technice). Ostatnim istotnym wnioskiem z badań była obserwacja, iż efektywność techniki JSw dla zbiorów żądań o podobnej wielkości była znacznie wyższa niż dla mocno zróżnicowanych zbiorach żądań. Druga technika przełączania wykazała wysoką skutecznością niezależnie od profilu ruchu sieciowego.



(a) profil ruchu: żądania jednorodne



(b) profil ruchu: żądania zróżnicowane

Rys. 8 Porównanie efektywności metod ochrony sieci EON/SDM: wymagana szerokość spektrum jako funkcja metody przełączania, metody ochrony przepływów oraz współczynnika ochrony żądań *SQ* na podstawie [O5]

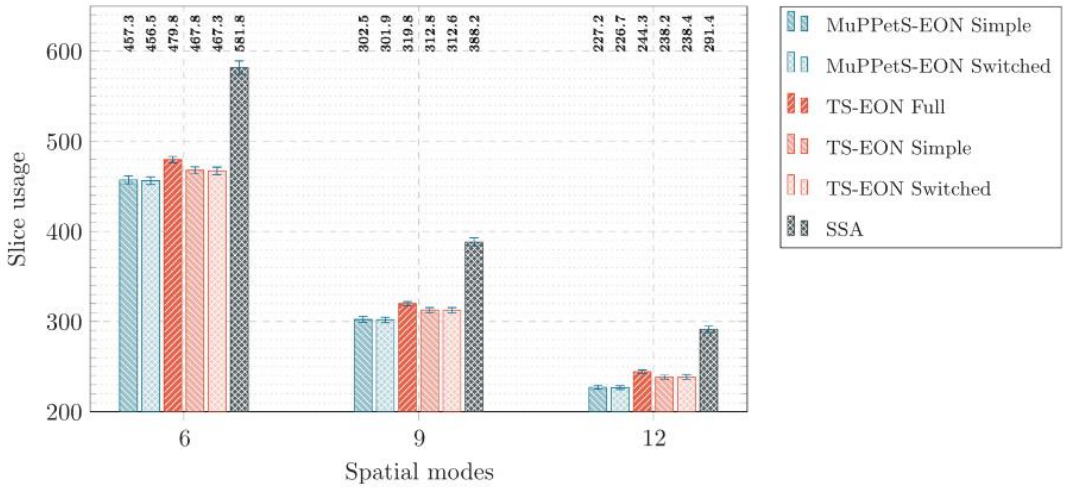
[O6] M. Przewoźniczek, R. Goścień, P. Lechowicz, K. Walkowiak, „Metaheuristic algorithms with solution encoding mixing for effective optimization of SDM optical networks", Engineering Applications of Artificial Intelligence 95, pp. 103843, 2020.

Poruszany problem optymalizacyjny	• Problem jednoczesnej optymalizacji przepływów typu unicast i anycast w sieciach EON/SDM chronionych metodą DPP oraz przy minimalizacji wykorzystania spektrum.
Zaproponowane narzędzia optymalizacyjne	• Model matematyczny oparty o programowanie liniowe całkowitoliczbowe (metoda dokładna). • Metoda metaheurystyczna Tabu Search. • Heurystyczna metoda referencyjna – SSA.

Cele badań symulacyjnych	• Weryfikacja efektywności metody Tabu Search:
	  o na tle metod referencyjnych,
	  o w zależności od konfiguracji sieci (proporcji żądań unicast i anycast, liczby centrów danych, liczby zasobów przestrzennych).
	• Porównanie efektywności dwóch technik kodowania rozwiązania w algorytmach metaheurystycznych.

Praca [O6] stanowi dalsze rozwinięcie tematu efektywnej ochrony elastycznej sieci optycznej ze zwielokrotnieniem przestrzennym za pomocą metody dedykowanej protekcji ścieżek z funkcją celu zdefiniowaną jako wykorzystanie spektrum. W artykule tym,

rozszerzyłam zagadnienia o architekturę sieci z centrami danych oraz obsługę ruchu anycast. Sformułowany w ten sposób problem optymalizacyjny opisałam w [O6] modelem matematycznym ILP. Model wykorzystałam następnie do opracowania metody dokładnej rozwiązania problemu (poprzez jego implementację i integrację ze środowiskiem IBM CPLEX). Aby umożliwić znajdowanie rozwiązań bliskich optimum dla dowolnie dużego przypadku testowego, w pracy zaprojektowałam i zaimplementowałam również dedykowany algorytm metaheurystyczny bazujący na metodologii Tabu Search. Co więcej, algorytm ten rozważyłam biorąc pod uwagę dwa różne sposoby kodowania rozwiązania problemu. Na potrzeby pracy zaprojektowałam i przygotowałam szereg scenariuszy badań symulacyjnych. Otrzymane wyniki wykazały wysoką efektywność oraz skalowalność zaproponowanego algorytmu Tabu Search jak również mechanizmu stosowania zmiennego kodowania rozwiązania problemu. Rys. 9 obrazuje przykładowe wyniki badań – wymaganą szerokość spektrum uzyskaną przez metaheurystyki MuPPetS-EON, Tabu Search (TS) oraz algorytm heurystyczny SSA. Wyniki przedstawione zostały dla różnych technik kodowania rozwiązania (Simple, Full, Switched) oraz w funkcji liczby dostępnych zasobów przestrzennych w sieci.



Rys. 9 Porównanie efektywności algorytmów (oraz technik kodowania rozwiązania: Simple, Switched, Full) optymalizacji przepływów unicast i anycast w sieciach EON/SDM z ochroną DPP: wymagana szerokość spektrum jako funkcja liczby dostępnych zasobów przestrzennych [O6]

[O7] R. Goścień, „On the Efficient Flow Restoration in Spectrally-Spatially Flexible Optical Networks", Electronics 10(12), pp. 1468, 2021.

Poruszany problem optymalizacyjny	• Problem optymalizacji przepływów typu unicast w sieciach EON/SDM przy minimalizacji wykorzystania spektrum w sieci. • Problem odzyskiwania przepływów typu unicast po wystąpieniu awarii/ataku w sieciach EON/SDM przy

	maksymalizacji sumarycznej wartości odzyskanych żądań.
Zaproponowane narzędzia optymalizacyjne	• Modele matematyczne oparte o programowanie liniowe całkowitoliczbowe (metody dokładne).
Cele badań symulacyjnych	• Porównanie efektywności i skalowalności modeli opartych o techniki węzłowo-połączeniową oraz ścieżkowo-połączeniową dla dwóch poruszanych problemów optymalizacyjnych. Wybór modeli najlepszych. • Porównanie efektywności dwóch technik przełączania w sieciach SDM (IndSw oraz FracSw) w zadaniu odzyskiwania danych po awarii/ataku. • Determinacja kosztu (pod względem niezbędnych zasobów sieciowych) odzyskania 100% danych w sieciach EON/SDM.

Tematyka prac [O5] i [O6] dotyczyła efektywnej ochrony elastycznej sieci optycznej ze zwielokrotnieniem przestrzennym przed skutkami awarii, czyli działań podejmowanych na etapie projektowania sieci. Działania takie pozwalają w bardzo krótkim czasie odzyskać całościowo łączność w sieci, jednak wymagają alokacji dodatkowych zasobów sieciowych oraz zwiększają jej koszt. W pracy [O7] analizuję natomiast efektywny proces odzyskiwania danych w elastycznej sieci optycznej ze zwielokrotnieniem przestrzennym po wystąpieniu awarii lub ataku (dowolnego typu). Proces taki nie gwarantuje odzyskania 100% danych, jednak nie wymaga alokowania żadnych nadmiarowych zasobów na etapie projektowania sieci, stąd jest rozwiązaniem znacząco tańszym.

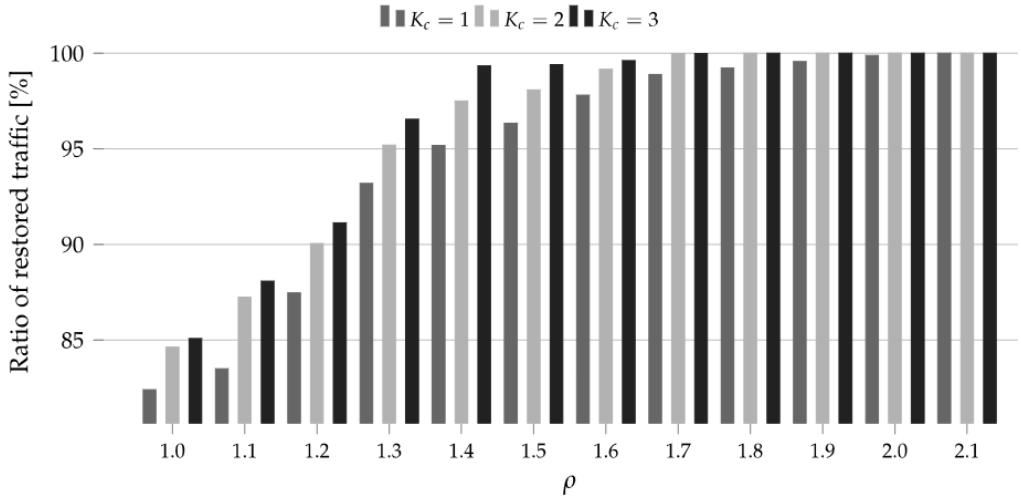
Przeprowadzone przeze mnie wcześniejsze badania [O5] oraz studia literaturowe [8] wykazały, iż przy normalnym (bezawaryjnym) trybie pracy sieci, metoda przełączania IndSw najefektywniej wykorzystuje zasoby spektralne. Postawiłam jednak w swoich badaniach hipotezę, iż istnieją specyficzne sytuacje, w których technika FracSw może wykazać się wyższą skutecznością niż IndSw. Tezę udowodniłam następnie dla dwóch ważnych scenariuszy: (*i*) restoracji danych po awarii/ataku (prace i wyniki opisane w pracy [O7]) oraz (*ii*) routingu dynamicznego przy wysokim obciążeniu sieci (wyniki opublikowane w [22] oraz rozwinięte w [O8]). W zidentyfikowanych scenariuszach część zasobów sieci jest niedostępna (przez wcześniej zaalokowane żądania) i znalezienie kanału o odpowiedniej szerokości w dziedzinie spektralnej (do odzyskania jakiegoś żądania lub alokacji nowego) może być zadaniem trudnym lub niemożliwym. Należy tutaj zauważyć, iż kanały przestrzenno-spektralne (wykorzystywane w metodzie FracSw) są zazwyczaj węższe w dziedzinie spektralnej niż kanały spektralne

(wykorzystywane w metodzie IndSw) mieszczące żądanie o tej samej wielkości. Stad też, metoda FracSw może pozwolić zaalokować żądania (odzyskiwane lub nowe), które w przypadku IndSw zostałyby odrzucone.

W celu zbadania efektywnego odzyskiwania danych w elastycznych sieciach optycznych ze zwielokrotnieniem przestrzennym, w pracy [O7] przeanalizowałam zadanie dwuetapowe. W pierwszym etapie skupiłam się na problemie projektowania (wymiarowania) sieci, tak żeby zrealizować zadany zbiór żądań i zminimalizować wykorzystanie spektrum. W tym zadaniu, wykorzystałam technikę przełączania IndSw, która w normalnych warunkach zapewnia najniższe wykorzystanie spektrum [O5], [8]. Celem pierwszego zadania było wyznaczenie podstawowych zasad routingu, czyli zasad wykorzystywanych w normalnym stanie sieci (tj. kiedy wszystkie elementy sieci działają poprawnie). W drugim etapie, rozwiązywałam problem odzyskiwania danych po wystąpieniu awarii/ataku (tj. działania przerywającego pracę pewnych elementów sieci). W zadaniu tym najpierw uaktualniałam topologię sieciową i stan jej zasobów, identyfikowałam żądania utracone (czyli takie dla których podstawowe ścieżki routingu (wyznaczone w pierwszym etapie) nie były już dostępne), a następnie przeprowadzałam próbę realokacji tych żądań z uwzględnieniem uaktualnionego stanu sieci. W problemie tym celem było sumaryczne odzyskanie jest największej ilości danych. Należy dodać, iż zaproponowany przeze mnie schemat odzyskiwania danych może zostać wykorzystany po wystąpieniu dowolnego typu awarii/ataku w sieci.

W pracy [O7] do każdego problemu zaproponowałam dwa modele matematyczne ILP, różniące się wykorzystywaną notacją opisu przepływów sieciowych (technika węzłowo-połączeniowa oraz ścieżkowo-połączeniowa). Dodatkowo, w przypadku problemu odzyskiwania danych, wzięłam pod uwagę dwie opcje przełączania dostępne w sieciach SDM – IndSw oraz FracSw. W ramach pracy przeprowadziłam również szerokie badania symulacyjne, podzielonych na dwie części: (*i*) porównanie zaproponowanych modeli oraz zdefiniowanie rekomendacji ich stosowania, (*ii*) sprawdzenie efektywności zaproponowanego schematu odzyskiwania danych, w szczególności weryfikacja korzyści wynikających z zastosowania przełączania grupowego przy odzyskiwaniu danych oraz determinacja kosztu całkowitego odzyskania danych (czyli ilości dodatkowych zasobów spektralnych, które należałoby wykorzystać aby odzyskać 100% danych). Uzyskane wyniki badań wykazały bardzo dużą skuteczność zaproponowanego schematu odzyskiwania danych. Potwierdziły one również tezę, iż wykorzystanie przełączania grupowego (w stosunku do wykorzystania tylko przełączania niezależnego) poprawia efektywność procesu odzyskiwania danych. Rys. 10 obrazuje ilość odzyskanych danych jako funkcję rozmiaru grupy przełączania K_c (przy czym K_c=1 to metoda IndSw, a K_c >1to FracSw) oraz ilości dodatkowych zasobów spektralnych (jako wielokrotność zasobów dostępnych w normalnych warunkach, ρ=1.0, 1.1, 1.2, …). Wyniki badań pokazują, iż zastosowanie metody FracSw pozwala odzyskać nawet ok. 4% więcej

danych (na rysunku dla ρ=1.4) oraz wymaga ok. 30-40% mniej dodatkowych zasobów niezbędnych do całkowitego odzyskania danych (dla K_c=1 całkowite odzyskane danych jest obserwowane dla ρ=2.1, natomiast dla K_c=2,3 wymagane jest ρ=1.7).



Rys. 10 Efektywność procesu odzyskiwania danych w sieciach EON/SDM: ilość odzyskanych danych jako funkcja współczynnika dodatkowych zasobów w sieci ρ oraz rozmiaru grupy przełączania zasobów przestrzennych K_c na podstawie [O7]

[O8] R. Goścień, P. Ksieniewicz, „Efficient Dynamic Routing in Spectrally-Spatially Flexible Optical Networks based on Traffic Categorization and Supervised Learning Methods", Optical Switching and Networking, 100650, 2021, https://doi.org/10.1016/j.osn.2021.100650.

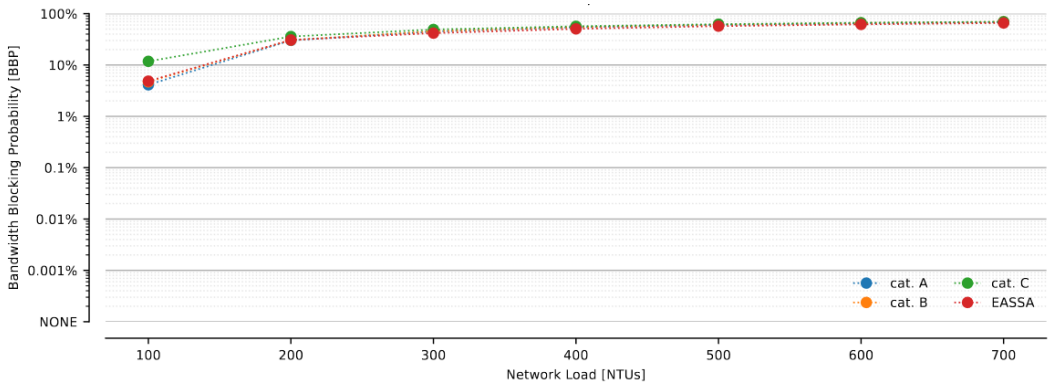
Poruszany problem optymalizacyjny	• Dynamiczny routing żądań unicast w sieciach EON/SDM (niechronionych oraz chronionych metodą DPP) przy minimalizacji sumarycznej wartości odrzuconych żądań.
Zaproponowane narzędzia optymalizacyjne	• Dedykowane algorytmy heurystyczne – ASSA, HLSSA, E-ASSA. • Adaptacje referencyjnych algorytmów heurystycznych – FF, LUPF, RAND. • Moduł kategoryzacji ruchu oraz dedykowana procedura jego strojenia bazująca na uczeniu nadzorowanym.
Cele badań symulacyjnych	• Strojenie metody E-ASSA z wykorzystaniem metod uczenia nadzorowanego. • Weryfikacja efektywności zaproponowanych metod: ○ na tle metod referencyjnych,

- jako funkcji stosowanej metody ochrony sieci (tj. brak ochrony lub ochrona DPP) oraz natężenia ruchu sieciowego.

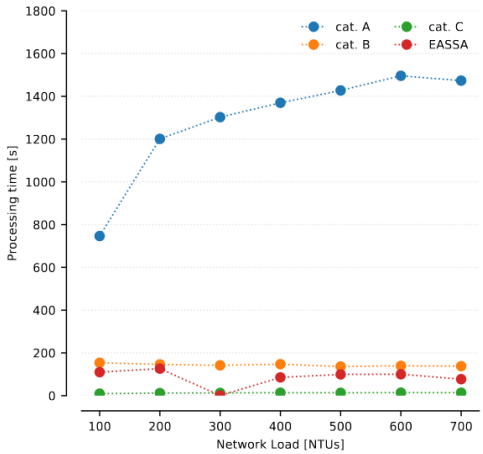
W swoich badaniach nad efektywnością sieci optycznych ze zwielokrotnieniem przestrzennym postawiłam hipotezę, iż tryb przełączania FracSw może wykazać się większą efektywnością niż IndSw w specyficznych sytuacjach. Tezę tę udowodniłam następnie dla dwóch ważnych scenariuszy: (*i*) alokacji dynamicznych żądań przy dużym natężeniu ruchu (w tym podczas alokacji z uwzględnieniem ochrony przepływów dedykowanymi ścieżkami) – wyniki badań przestawione w pracach [22] oraz [O8], (*ii*) restoracji danych po wystąpieniu awarii/ataku – wyniki opublikowane w pracy [O7]. W wyniku tak postawionej hipotezy oraz zdefiniowanych scenariuszach jej dowodzenia, poszerzyłam swoje rozważania przeżywalnych sieci ze zwielokrotnieniem przestrzennym o zagadnienie dynamicznej alokacji żądań.

W pracy [O8] zdefiniowałam problem dynamicznego routingu żądań typu unicast w elastycznych sieciach optycznych ze zwielokrotnieniem przestrzennym przy minimalizacji sumarycznej wartości odrzuconych żądań. Problem ten rozważyłam z uwzględnieniem dedykowanej protekcji ścieżek oraz, celem weryfikacji wpływu ochrony na efektywność algorytmów i sieci, bez implementacji metody ochrony przepływów. Dla zadanego problemu optymalizacyjnego zaproponowałam dedykowane algorytmy heurystyczne: Adaptive Spatial-Spectral Allocation (ASSA), High-Load Spatial-Spectral Allocation (HLSSA) oraz Enhanced Adaptive Spatial-Spectral Allocation (E-ASSA). Główną ideą algorytmu ASSA jest wybór zasad alokacji żądań bazując na ciągłym monitorowaniu stanu sieci oraz dostępności jej zasobów. W celu efektywnego wybierania kanałów dla żądań, algorytm ten wykorzystuje procedurę HLSSA, która pozwala na alokację przestrzenno-spektralną tylko w przypadku wysokiego obciążenia sieci i jednocześnie priorytetyzuje kanały rozłożone na jak najmniejszej liczbie zasobów przestrzennych. Jak pokazały wstępnie badania, metoda ASSA zapewnia bardzo niski współczynnik odrzucenia żądań, jednak charakteryzuje się dość długim czasem obliczeń. Stąd też, zaprojektowałam metodę E-ASSA (jako rozwinięcie ASSA), celem stworzenia algorytmu zapewniającego niski współczynnik odrzucenia (na podobnym poziomie do ASSA) ale równocześnie dużo krótszy czas obliczeń. W metodzie E-ASSA zaimplementowałam dodatkowo dynamiczną kategoryzację napływających żądań oraz adaptacyjne zasady alokacji bazując na zidentyfikowanych kategoriach. W algorytmie zdefiniowałam trzy kategorie żądań i dla każdej z nich dedykowaną procedurę poszukiwania kanałów. Procedury te różnią się między sobą złożonością, która wpływa na prawdopodobieństwo znalezienia wolnego kanału oraz czas obliczeń. Należy zauważyć, iż wspomniane kategorie ruchu tworzone są tylko i wyłącznie na potrzeby algorytmu i nie odzwierciedlają realizowanych usług. Kategoryzacja żądań odbywa się na podstawie analizy

ich wielkości oraz czasu trwania, natomiast do zdefiniowania reguł kategoryzacji zaprojektowałam dedykowaną procedurę bazującą na uczeniu nadzorowanym. Następnie, przeprowadziłam obszerne badania symulacyjne celem przeprowadzenia strojenia algorytmów oraz weryfikacji ich efektywności. Wyniki badań potwierdzają wysoką skuteczność zaproponowanych algorytmów alokacji oraz wykazują, iż zastosowanie ochrony przepływów w sieci znacząco wpływa na wzrost współczynnika odrzucenia żądań. Wzrost ten jednak mocno zależy od natężenia ruchu w sieci. Co więcej, uzyskane zależności potwierdziły postawioną tezę, iż metoda FracSw zapewnia wyższą efektywność sieci niż IndSw przy routingu dynamicznym i wysokim natężeniu ruchu. Dodatkowo, wyniki badań pokazują iż E-ASSA zapewnia niski wskaźnik odrzucenia żądań (zbliżony do ASSA) oraz krótki czas obliczeń (czas obliczeń kilka-kilkanaście razy krótszy niż dla ASSA). Rys. 11 i 12 przedstawiają przykładowe wyniki badań dla sieci implementującej mechanizm DPP – porównanie współczynnika odrzucenia żądań oraz czasu obliczeń dla czterech badanych algorytmów: E-ASSA, cat. A (wszystkie żądania alokowane wg zasad dedykowanych dla kategorii cat. A), cat. B (żądania alokowane wg zasad dla cat. B) oraz cat. C (żądania alokowane wg zasad dla cat. C). Należy zaznaczyć, iż metoda ASSA jest odpowiednikiem stosowania jedynie zasad cat. A.



Rys. 11 Porównanie algorytmów dynamicznej alokacji żądań unicast w sieciach EON/SDM implementujących ochronę DPP: współczynnik odrzucenia żądań jako funkcja natężenia ruchu w sieci na podstawie [O8]



Rys. 12 Porównanie algorytmów dynamicznej alokacji żądań unicast w sieciach EON/SDM implementujących ochronę DPP: czas obliczeń jako funkcja natężenia ruchu w sieci na podstawie [O8]

4.4 Podsumowanie osiągnięcia naukowego i uzyskanych wyników

Prace wchodzące w skład prezentowanego osiągnięcia naukowego są odpowiedzią na zidentyfikowane aktualne trendy oraz potrzeby rozwoju badań związanych z sieciami teleinformatycznymi (Rozdział 4.2 niniejszego dokumentu). Każda z prac proponuje szereg modeli i algorytmów pozwalających projektować i optymalizować nowoczesne sieci teleinformatyczne z uwzględnieniem ich ochrony przed skutkami nieuniknionych awarii i ataków. Dodatkowo, w pracach prezentowane są wyniki i wnioski z badań symulacyjnych, przeprowadzonych celem weryfikacji efektywności zaproponowanych narzędzi optymalizacyjnych oraz zbadania efektywności przeżywalnych transportowych sieci optycznych w różnych konfiguracjach.

Na wyższym poziomie szczegółowości, w ramach osiągnięcia zaproponowałam i przebadałam modele i algorytmy rozwiązania dla następujących problemów optymalizacyjnych:

- problem jednoczesnej optymalizacji trzech typów przepływów sieciowych (unicast, anycast, multicast) w elastycznych sieciach optycznych z dedykowaną protekcją ścieżek przy minimalizacji wykorzystania spektrum – prace [O1], [O2],
- problem wyznaczenia lokalizacji centrów danych oraz jednoczesnej optymalizacji przepływów unicast i anycast w elastycznych sieciach optycznych z dedykowaną protekcją ścieżek przy minimalizacji wykorzystania spektrum – praca [O3],
- problem wyboru węzłów sieci do ochrony (przed promieniowaniem elektromagnetycznym o nadmiernej mocy) za pomocą bunkrów oraz jednoczesnej optymalizacji przepływów unicast w elastycznych sieciach optycznych implementujących routing wielościeżkowy przy minimalizacji wykorzystania spektrum oraz podatności sieci na ataki z impulsem elektromagnetycznym – praca [O4],
- problem optymalizacji przepływów unicast w elastycznych sieciach optycznych ze zwielokrotnieniem przestrzennym przy minimalizacji wykorzystania spektrum (problem rozważany z uwzględnieniem różnych technik przełączania w sieciach ze zwielokrotnieniem przestrzennym (IndSw, JSw), różnych metod ochrony przepływów (brak ochrony, dedykowana protekcja ścieżek, współdzielona protekcja ścieżek) oraz różnego stopnia ochrony przepływów (od 0% do 100% z krokiem co 10%)) – prace [O5], [O7],
- problem jednoczesnej optymalizacji przepływów unicast i anycast w elastycznych sieciach optycznych ze zwielokrotnieniem przestrzennym implementujących dedykowaną protekcję ścieżek przy minimalizacji wykorzystania spektrum – praca [O6],

- problem odzyskiwania (restoracji) przepływów unicast po wystąpieniu awarii/ataku w elastycznych sieciach optycznych ze zwielokrotnieniem przestrzennym przy maksymalizacji sumarycznej wartości odzyskanych żądań – praca [O7],
- problem dynamicznej alokacji żądań unicast w elastycznych sieciach optycznych ze zwielokrotnieniem przestrzennym (niechronionych i chronionych za pomocą dedykowanej protekcji ścieżek) przy minimalizacji sumarycznej wartości odrzuconych żądań – praca [O8].

Dla wymienionych powyżej problemów zaprojektowałam i zaimplementowałam następujące narzędzia optymalizacyjne:

- modele matematyczne (oparte na technice programowania liniowego całkowitoliczbowego) oraz metody dokładne bazujące na implementacji zaproponowanych modeli – prace [O1]-[O7],
- metoda dekompozycji bazująca na technice generacji kolumn oraz metody ją wspomagające – praca [O1],
- dedykowane algorytmy heurystyczne – prace [O1], [O3], [O4], [O5], [O6], [O8],
- dedykowane algorytmy metaheurystyczne:
    - algorytm sztucznej kolonii pszczół – ABC – praca [O2],
    - algorytm Tabu Search – TS – praca [O6].

Szeroki przekrój zaproponowanych przeze mnie metod (pod względem ich typu) pozwala rozwiązać dowolny przypadek testowy problemu i znaleźć zadowalający kompromis pomiędzy jakością znajdowanego rozwiązania a wymaganymi zasobami obliczeniowymi i czasowymi.

Chciałabym również podkreślić, iż wszystkie zaproponowane narzędzie optymalizacyjne są generyczne i mogą zostać bezpośrednio (bez żadnych modyfikacji) wykorzystane do rozwiązywania podproblemów rozważanych problemów optymalizacyjnych (np. algorytm zaproponowany do optymalizacji trzech typów przepływów (unicast, anycast, multicast) może zostać bezpośrednio wykorzystany do optymalizacji dowolnych dwóch typów przepływów lub tylko jednego z nich) oraz w łatwy sposób zmodyfikowane do rozwiązywania podobnych problemów optymalizacyjnych.

Opracowane narzędzia optymalizacyjne wykorzystałam następnie do przeprowadzenia obszernych badań symulacyjnych, których celem była weryfikacji efektywności tych narzędzi oraz zbadanie efektywności przeżywalnych transportowych sieci optycznych w różnych konfiguracjach. Badania przeprowadziłam z wykorzystaniem modeli fizycznych sieci odpowiadających aktualnie wykorzystywanym urządzeniom oraz technikom transmisyjnym. Do ich wykonania skorzystałam z modeli rzeczywistych transportowych sieci optycznych – krajowych (PL12 – sieć Polski; DT14 – sieć Niemiec; NSF15, US26 – sieci USA) oraz

europejskich (Euro16, Euro28). Zastosowane przeze mnie w symulacjach funkcje celu odpowiadają najważniejszym parametrom z punktu widzenia efektywnych sieci – wykorzystaniu spektrum (które wpływa również na koszt budowy i utrzymania sieci) oraz przeżywalności mierzonej jako ilość utraconych danych w przypadku awarii/ataku. Co więcej, do badań przygotowałam różnorodne scenariusze testowe, które pozwoliły zbadać konfiguracje sieciowe z uwzględnieniem różnych:

- technologii nowoczesnych optycznych sieci transportowych (elastyczne sieci optyczne, sieci ze zwielokrotnieniem przestrzennym),
- typów przepływów sieciowych, pozwalających modelować szereg różnych usług sieciowych (unicast, anycast, multicast),
- charakteru alokowanych przepływów sieciowych (alokacja statyczna i dynamiczna),
- adresowanych schematów awarii/ataków (awaria dowolnego łącza w sieci, awaria/atak dowolnego typu (skutkująca niedostępnością podzbioru zasobów sieci), atak z impulsem elektromagnetycznym),
- metod zapewnienia przeżywalności (brak ochrony, dedykowana protekcja ścieżek, współdzielona protekcja ścieżek, alokacja wielu ścieżek zapasowych (routing wielościeżkowy), częściowa ochrona przepływów).

Bardzo szeroki i różnorodny zbiór przebadanych scenariuszy testowych sprawia, iż wyniki przeprowadzonych badań mają charakter praktyczny i mogą zostać wykorzystane w rzeczywistych sieciach.

Podsumowując, omawiane osiągnięcie przyczynia się do rozwoju wiedzy i nauki z zakresu informatyki technicznej poprzez wprowadzenie:

- pakietu modeli i algorytmów, pozwalających projektować i optymalizować struktury efektywnych i przeżywalnych sieci teleinformatycznych,
- kompendium wiedzy i zależności dotyczących przeżywalnych sieci teleinformatycznych opracowane na podstawie obszernych badań symulacyjnych.

Przedstawione osiągnięcie jest więc odpowiedzią na aktualne potrzeby rynku sieci teleinformatycznych oraz istotnym rozwojem wiedzy z zakresu informatyki oraz telekomunikacji. Otrzymane wyniki mogą znaleźć zastosowanie przy projektowaniu/optymalizacji rzeczywistych sieci teleinformatycznych oraz opracowywaniu nowych protokołów i standardów sieciowych.

4.5 Literatura pomocnicza

[1] A. Leon-Garcia, I. Widjaja, Communication Networks, McGraw-Hill Education, 2nd edition (July 16, 2003).

[2] Cisco Company. Cisco Internet Annual Report (2018-2022). White paper. March 2020.

[3] A. Lutu, et al., "A characterization of the covid-19 pandemic impact on a mobile network operator traffic", in proc. of *ACM Internet Measurement Conference*, 2020.

[4] N. Skorin-Kapov, et al. "Physical-layer security in evolving optical networks", *IEEE Communications Magazine* 54(8): 110-117, 2016.

[5] J. Rak, Resilient routing in communication networks, Springer (November 11 2015).

[6] R. Goścień, et al. "Protection in elastic optical networks", *IEEE Network* 29(6): 88-96, 2015.

[7] M. Jinno, et al. "Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies", *IEEE communications magazine* 47(11): 66-73, 2009.

[8] M. Klinkowski, P. Lechowicz and K Walkowiak, "Survey of resource allocation schemes and algorithms in spectrally-spatially flexible optical networking", *Optical Switching and Networking* 27: 58-78, 2018.

[9] MordorIntelligence. Data Center Services Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2021 - 2026). Dostępne online [17.09.21]: https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/service-market-for-data-center

[10] K. Walkowiak. "Anycasting in connection-oriented computer networks: Models, algorithms and results", International Journal of Applied Mathematics and Computer Science 20(1): 207-220, 2010.

[11] K. Walkowiak, et al. "Optimization of multicast traffic in elastic optical networks with distance-adaptive transmission", *IEEE Communications Letters* 18(12): 2117-2120, 2014.

[12] F. Musumeci, et al. "An overview on application of machine learning techniques in optical networks", *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 21(2): 1383-1408, 2018.

[13] R. Goścień, "*On the efficient column generation-based optimization of anycast traffic in survivable elastic optical networks*", in proc. of 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). IEEE, 2017.

[14] R. Goścień, "*On the initialization in column generation for cloud-ready and survivable EONs*", in proc. of 9th International Workshop on Resilient Networks Design and Modeling (RNDM). IEEE, 2017.

[15] X. S. Yang. *Nature-inspired optimization algorithms*. Academic Press, 2020.

[16] J. A. Delgado-Osuna, M. Lozano and C. García-Martínez. "An alternative artificial bee colony algorithm with destructive–constructive neighbourhood operator for the problem of composing medical crews", *Information Sciences* 326: 215-226, 2016.

[17] A. Muhammad, N. Skorin-Kapov and M. Furdek, "Manycast, anycast, and replica placement in optical inter-datacenter networks", *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking* 9(12):1161-1171, 2017.

[18] Y. Chen, R. H. Katz, and J. D. Kubiatowicz, "Dynamic replica placement for scalable content delivery", in proc of. *International Workshop on Peer-to-Peer Systems*, 2002.

[19] Nuclear Security Summit 2016. Dostępne online [17.09.21]: http://www.nss2016.org/

[20] E. Savage, J. Gilbert, W. Radasky, Metatech corporation report, meta-r-320. The early-time (E1) high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) and its impact on the US power grid. January 2010.

[21] R. Goścień, et al. "Protection in elastic optical networks", *IEEE Network* 29(6): 88-96, 2015.

[22] R. Goścień, "On the efficient dynamic routing in spectrally-spatially flexible optical networks", in proc. of *11th International Workshop on Resilient Networks Design and Modeling (RNDM)*, IEEE, 2019.

[23] R. Goścień, A. Knapińska and A. Włodarczyk. "Modeling and Prediction of Daily Traffic Patterns—WASK and SIX Case Study." *Electronics* 10(14):1637, 2021.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

- W ramach swojej aktywności naukowej od roku 2013 jestem związania z Politechniką Wrocławską:
    - w październiku 2013 rozpoczęłam studia doktoranckie na Wydziale Elektroniki, przygotowaną rozprawę obroniłam z wyróżnieniem w listopadzie 2016,
    - w lutym 2015 roku rozpoczęłam pracę jako asystent badawczo-dydaktyczny w Katedrze Systemów i Sieci Komputerowych (Wydział Elektroniki – do 14.09.2021, Wydział Informatyki i Telekomunikacji – aktualnie), natomiast od października 2017 pracuję jako adiunkt badawczo-dydaktyczny w tej samej jednostce.
- W okresie od sierpnia 2013 do listopada 2014 pracowałam w Instytucie Łączności – Państwowym Instytucie Badawczym (Polska). Początkowo jako stażysta naukowy, a następnie jako młodszy specjalista inż.-tech. W przypadku obu stanowisk wykonywałam pracę badawczą.
- Od początku swojej kariery naukowej odbyłam liczne staże naukowe, a w ich wyniku – nawiązałam międzynarodowe współprace naukowe:
    - Universitat Politecnica de Catalunya (Barcelona, Hiszpania), 10-21 X 2018
      Staż rozpoczął współpracę z grupą badawczą prof. Salvatore Spadaro w zakresie optymalizacji sieci ze zwielokrotnieniem przestrzennym oraz ich stopniowej implementacji. W ramach współpracy z grupą prof. Spadaro powstał artykuł naukowy:

[IF: 9.619, PKT: 200] P. Lechowicz, R. Goścień, R. Rumipamba-Zambrano, J. Perello, S. Spadaro and K. Walkowiak, "Greenfield Gradual Migration Planning toward Spectrally-Spatially Flexible Optical Networks," in IEEE Communications Magazine 57(10), pp. 14-19, 2019.

- Virginia Commonwealth University (Richmond, VA, USA), 27 X 2017 – 12 XI 2017 oraz 13 VII 2017 – 28 VII 2017

  Staż odbywał się w grupie badawczej prof. Krzysztofa Ciosa. Jego tematyka dotyczyła wykorzystania algorytmów uczenia maszyn do wspomagania optymalizacji sieci teleinformatycznych (w szczególności ich zastosowania do predykcji ruchu sieciowego). Na podstawie wiedzy uzyskanej podczas stażu przygotowałam wniosek projektowy, który uzyskał finansowanie NCNu w ramach programu Sonata (tytuł: „Optymalizacja szkieletowych sieci optycznych z wykorzystaniem narzędzi modelowania i predykcji ruchu sieciowego”).

- KTH Royal Institute of Technology (Sztokholm, Szwecja), 26-30 VI 2017

  W ramach stażu nawiązałam współpracę z grupą badawczą prof. Leny Wosińskiej. Tematyka wspólnych badań dotyczyła podatności sieci ze zwielokrotnieniem przestrzennym na ataki zagłuszające (ang. jamming attacks), oszacowania negatywnych skutków ataków na te sieci oraz opracowania metod ochrony. Wyniki wspólnych prac zostały opublikowane w artykule:

  R. Goścień, C. Natalino, L. Wosinska and M. Furdek, "Impact of high-power jamming attacks on SDM networks," *2018 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, 2018, pp. 77-81.

- Granada University (Granada, Hiszpania), 13-20 VI 2016

  W ramach stażu nawiązałam współpracę z prof. Manuelem Lozano w zakresie projektowania algorytmów optymalizacji inspirowanych naturą, ze szczególnym uwzględnieniem algorytmu sztucznej kolonii pszczół i jego zastosowania do optymalizacji elastycznych sieci optycznych. Wyniki wspólnych prac zostały opublikowane w artykule:

  [IF: 3.167, PKT: 140] R. Goścień, M. Lozano, “Artificial Bee Colony for optimization of cloud-ready and survivable elastic optical networks”, Computer Communications 128, pp. 35-45, 2018.

- Politecnico di Milano (Mediolan, Włochy), 9-24 VII 2015

  Staż rozpoczął współpracę z grupą badawczą prof. Massimo Tornatore w zakresie optymalizacji elastycznych sieci optycznych. Wynikiem tej współpracy jest artykuł:

  [IF: 3.984, PKT: 100] R. Goścień, K. Walkowiak and M. Tornatore, "Survivable multipath routing of anycast and unicast traffic in elastic optical networks," in IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking 8(6), pp. 343-355, 2016.

- W latach 2016-2020 uczestniczyłam w europejskiej akcji COST CA15127, *Resilient Communication Services Protecting End-user Applications from Disaster-based Failures*, (RECODIS):
  - byłam członkiem komitetu sterującego w randze *MC Substitute Member*,
  - prowadziłam badania naukowe z zakresu ochrony sieci teleinformatycznych przed skutkami awarii/ataków wielkiej skali, w szczególności w ramach grupy roboczej WG4 skupiającej się na ochronie sieci przed skutkami ataków (WG4: Malicious human activities),
  - nawiązałam bezpośrednią współpracę badawczą (wspólne prace i artykuły naukowe) z pracownikami KTH Royal Institute of Technology (Sztokholm, Szwecja) oraz Universidad de Aveiro (Aveiro, Portugalia). Wyniki wspólnych prac zostały opublikowane w następujących artykułach:

    [IF: 2.786, PKT: 40] F. Barbosa, A. de Sousa, A. Agra, K. Walkowiak and R. Goścień. „RMSA algorithms resilient to multiple node failures in dynamic EONs”, Optical Switching and Networking 42, pp. 100633, 2021.

    F. Barbosa, A. de Sousa, A. Agra, K. Walkowiak and R. Goścień, "A RMSA Algorithm Resilient to Multiple Node Failures on Elastic Optical Networks", in proc. of International Workshop on Resilient Networks Design and Modeling (RNDM). IEEE, 2019.

    R. Goścień, C. Natalino, L. Wosińska, M. Furdek, "Impact of high-power jamming attacks on SDM networks", in proc. of International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM). IEEE, 2018.

  - odbyłam staż naukowy w ośrodku KTH Royal Institute of Technology (Sztokholm, Szwecja),

- byłam organizatorem sesji specjalnej *COST Action CA15127, RECODIS* podczas międzynarodowej konferencji naukowej *Design of Reliable Communication Networks* (DRCN), 19-21.03.2019, Coimbra, Portugalia,
- jestem współautorką i edytorką rozdziału w książce powstałej w ramach prac projektowych:

  R. Goścień, et al. "Security-Aware Carrier Network Planning." Guide to Disaster-Resilient Communication Networks. Springer, Cham, 2020. 193-217.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

- Od 2013 roku współpracuję z kołem naukowym SISK (Systemy Informatyczne i Sieci Komputerowe) działającym przy Katedrze Systemów i Sieci Komputerowych, (Politechnika Wrocławska) w roli mentora oraz współorganizatora wielu wydarzeń:
  - w ramach działalności koła prowadziłam warsztaty sieciowe Lag – warsztaty dla studentów zainteresowanych tematyką sieci teleinformatycznych, prowadzone w laboratorium ze sprzętem sieciowym,
  - współorganizowałam maraton programistyczny JellyPizzaHack, który odbył się 16-17.12.2016 na Politechnice Wrocławskiej,
  - w latach 2015-2019 współorganizowałam konferencję naukową Polish-British Workshop/International Students Workshop (międzynarodowa konferencja dla studentów) i uczestniczyłam we wstępnym recenzowaniu/rekomendowaniu kandydatów na tę konferencję.
- Pełniłam rolę promotora pomocniczego przy rozprawie doktorskiej pana Piotra Lechowicza. Rozprawa pt. „*Algorithms for flow assignment and resource allocation in spectrally-spatially flexible optical networks*” została obroniona z wyróżnieniem we wrześniu 2019.
- Byłam promotorem 11 prac magisterskich z informatyki oraz 32 inżynierskich z zakresu informatyki i teleinformatyki. Wszystkie prace zostały obronione.
- Od października 2018 roku jestem członkiem komisji dyplomowej dla studiów drugiego stopnia (magisterskich) kierunku Teleinformatyka, specjalność Projektowanie sieci teleinformatycznych.
- Jestem autorką i opiekunem dwóch kursów prowadzonych na studiach magisterskich na wydziale Informatyki i Telekomunikacji (Politechnika Wrocławska):
  - Algorytmy optymalizacji inspirowane naturą (wykład + projekt, kurs na studiach magisterskich na kierunku Informatyka techniczna),

    - Nowe trendy w teleinformatyce (wykład + seminarium, kurs na studiach magisterskich na kierunku Teleinformatyka, specjalność Projektowanie sieci teleinformatycznych.
- Jestem opiekunem kursu Projektowanie sieci teleinformatycznych (projekt) prowadzonego na szóstym semestrze studiów inżynierskich na kierunku Teleinformatyka, specjalność Projektowanie sieci teleinformatycznych.
- Aktywnie uczestniczę w procesie dydaktycznym studentów prowadząc szereg kursów z zakresu informatyki i teleinformatyki. Prowadzę lub prowadziłam następujące kursy:
    - Algorytmy optymalizacji inspirowane naturą (wykład),
    - Zaawansowane metody projektowania sieci teleinformatycznych (wykład, projekt),
    - Projektowanie sieci komputerowych (projekt),
    - Modeling and optimization of computer networks (seminarium, projekt, laboratorium – zajęcia w języku angielskim),
    - Research skills and methodologies 1 (seminarium, projekt, laboratorium – zajęcia w języku angielskim),
    - Seminarium dyplomowe (seminarium),
    - Seminarium specjalnościowe (seminarium),
    - Projektowanie sieci teleinformatycznych (projekt),
    - Technologie sieciowe (projekt, laboratorium),
    - Programowanie obiektowe (laboratorium),
    - Teoria systemów (ćwiczenia),
    - Bazy danych (laboratorium).

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

- Od X 2021 jestem członkiem *Academia Iuvenum* – organizacji powołanej na Politechnice Wrocławskiej, zrzeszającej wybitnych młodych naukowców po doktoracie.
- Otrzymałam nagrody za najlepsze artykuły naukowe:
    - Best Paper Award podczas międzynarodowej konferencji naukowej Resilient Network Design and Modeling (RNDM) 2015,
    - Fabio Neri Best Paper Award 2014 in Elsevier Journal of Optical Switching and Networking - nagroda za najlepszą pracę opublikowaną w roku 2014 w czasopiśmie Optical Switching and Networking.

- Za swoją pracę naukową zostałam uhonorowana wieloma nagrodami, spośród których najważniejsze to:
    - Nagroda Prezesa Rady Ministrów za wyróżniającą rozprawę doktorską – przyznana 2017,
    - Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla Wybitnych Młodych Naukowców – 2019,
    - Stypendium FNP (Fundacja na rzecz Nauki Polskiej) START – 2019,
    - Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla doktorantów na rok akademicki 2016/2017,
    - Specjalne wyróżnienie w konkursie o Nagrodę im. Witolda Lipskiego dla młodych naukowców w zakresie informatyki – 2018,
    - Stypendium im. H. Steinhausa w zakresie nauk matematycznych w ramach Studenckiego Programu Stypendialnego miasta Wrocławia 2015.

……..……..…….
(podpis wnioskodawcy)