

Załącznik 2

Autoreferat: Zaawansowane metody optymalizacji kombinatorycznej w projektowaniu i zarządzaniu sieciami telekomunikacyjnymi

1 Dane osobowe i przebieg zatrudnienia w jednostkach naukowych

1.1 Imię i nazwisko

Mateusz Wojciech ŻOTKIEWICZ

1.2 Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania:

- tytuł zawodowy inżyniera (Bachelor of Engineering, First Class Honours) w zakresie European Engineering Studies, Uniwersytet w Coventry, 2005 r., praca inżynierska pt.: „Ethernet designer”,
- tytuł zawodowy magistra inżyniera (celujący) w zakresie elektroniki, informatyki i telekomunikacji, specjalizacja: Teleinformatyka i Zarządzanie w Telekomunikacji, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, Politechnika Warszawska, 2007 r., praca magisterska pt.: „Metro Ethernet optimization”,
- stopień naukowy doktora nauk technicznych (z wyróżnieniem) w dyscyplinie telekomunikacja, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, Politechnika Warszawska oraz w dyscyplinie informatyka, TELECOM SudParis (podwójne dyplomowanie), 2011 r., rozprawa doktorska pt.: „Robust routing optimization in resilient networks – polyhedral model and complexity issues”.

1.3 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:

- od 04.2009 do 02.2010 – asystent w zakładzie Réseaux et Services Multimédia Mobiles, TELECOM SudParis, Evry, Francja,
- od 04.2010 do 03.2011 – asystent w Zakładzie Teleinformatyki i Telekomutacji, Instytut Telekomunikacji, Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych, Politechnika Warszawska,
- od 04.2011 do 02.2015 – adiunkt w Zakładzie Teleinformatyki i Telekomutacji, Instytut Telekomunikacji, Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych, Politechnika Warszawska,
- od 02.2015 – adiunkt w Zakładzie Sieci i Usług Teleinformatycznych, Instytut Telekomunikacji, Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych, Politechnika Warszawska.

2 Tytuł osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie naukowe, uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiące istotny wkład autora w rozwój przedmiotowej dyscypliny naukowej, wskazuję cykl publikacji powiązanych tematycznie zatytułowany „Zaawansowane metody optymalizacji kombinatorycznej w projektowaniu i zarządzaniu sieciami telekomunikacyjnymi”. W skład osiągnięcia wchodzi przedstawione w następnym rozdziale publikacje [C1–C10].

3 Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe

Poniżej zamieszczam listę publikacji, wchodzących w skład osiągnięcia naukowego, wraz z krótkim opisem artykułów oraz mojego w nim udziału. Kolejność artykułów odpowiada kolejności ich opisu w dalszej części autoreferatu.

- [C1] Pióro, M., Żotkiewicz, M., Staehle, B., Staehle, D., Yuan, D.: On max-min fair flow optimization in wireless mesh networks. *Ad Hoc Networks* **13**(Part A), 134–152 (2014). DOI 10.1016/j.adhoc.2011.05.003. IF=1,530.

*Artykuł dotyczy badania efektywnego rozwiązywania problemów alokacji zasobów w postaci szczelin czasowych dla poszczególnych transmisji w radiowych sieciach kratowych. Mój wkład polegał na współudziale przy określeniu koncepcji oraz wyborze metody badań, opracowaniu wraz z prof. Michałem Pióro stosownych programów całkowitoliczbowych wykorzystanych w badaniach, zaproponowaniu uproszczonej metody określania poziomu interferencji w poszczególnych węzłach, zaproponowaniu rozróżnienia pomiędzy statycznym a dynamicznym sposobem przydziału zasobów, implementacji wszystkich modeli matematycznych, przeprowadzeniu wszystkich eksperymentów dotyczących tych modeli (metoda heurystyczna została zaproponowana i zaimplementowana przez B. Staehle) oraz współudziale przy formułowaniu wniosków oraz tworzeniu artykułu. **Udział własny szacuję na 25%**.*

- [C2] Żotkiewicz, M.: Max-min fairness in WMNs with interference cancelation using overheard transmissions. *Journal of Applied Mathematics* **2014**, 1–9 (2014). DOI 10.1155/2014/625642.

*Artykuł dotyczył możliwości zwiększenia przepustowości bezprzewodowych sieci kratowych poprzez wykorzystanie wiedzy o podsłuchanych transmisjach. **Artykuł samodzielny.***

- [C3] **Żotkiewicz, M., Pióro, M.:** Exact approach to reliability of wireless mesh networks with directional antennas. *Telecommunication Systems* **56**(1), 201–211 (2014).

DOI 10.1007/s11235-013-9829-4. IF=0,705.

*Artykuł dotyczył problemu minimalizacji kosztów bezawaryjnych bezprzewodowych sieci kratowych zbudowanych z anten kierunkowych. Mój wkład polegał na samodzielnym określeniu koncepcji oraz wyborze metodyki badań, opracowaniu stosownych programów całkowitoliczbowych, implementacji eksperymentów oraz współudziale przy formułowaniu wniosków oraz tworzeniu artykułu. **Udział własny szacuję na 80%.***

- [C4] Ruiz, M., Pióro, M., **Żotkiewicz, M.**, Klinkowski, M., Velasco, L.: Column generation algorithm for RSA problems in flexgrid optical networks. *Photonic Network Communications* **26**(2-3), 53–64 (2013).

DOI 10.1007/s11107-013-0408-0. IF=0,75.

*Artykuł powstał w czasie pobytu dra Marca Ruiza w Warszawie wiosną 2012 roku i opisywał metodę przydziału zasobów w elastycznych sieciach optycznych opartą na technikach generacji kolumn. Mój wkład w powstanie pracy polegał na proponowaniu, weryfikacji i opiniowaniu założeń dotyczących artykułu składanych przez dra Ruiza i prof. Pióro, czynnym udziale w tworzeniu modeli matematycznych użytych w badaniach, proponowaniu efektywnych sposobów implementacji metod optymalizacyjnych stworzonych przez dra Ruiza, zaproponowaniu usprawnień do metody generacji ścieżek, zaproponowaniu metod wyboru ścieżek bazowych oraz poprawie i edycji tekstu. **Udział własny szacuję na 10%.***

- [C5] **Żotkiewicz, M.**, Ruiz, M., Klinkowski, M., Pióro, M., Velasco, L.: Reoptimization of dynamic flexgrid optical networks after link failure repairs. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking* **7**(1), 49–61 (2015).

DOI 10.1364/JOCN.7.000049. IF=2,183.

*Artykuł w dużej mierze powstał w czasie mojego pobytu w Barcelonie wiosną 2013 roku i opisywał metodę rekonfiguracji elastycznych sieci optycznych po usunięciu awarii w celu racjonalizacji wykorzystania zasobów. Mój wkład w powstanie pracy polegał na szczegółowym określeniu rozwiązywanego problemu, opracowaniu i implementacji metod optymalizacyjnych (z wyłączeniem metody weryfikacji rozwiązań opisanej w sekcji IV.D zaproponowanej i zaimplementowanej przez dra Ruiza) oraz napisaniu większości tekstu—testy zaimplementowanej przez mnie metody oraz opracowanie wyników zostało zrealizowane przez dra Ruiza. **Udział własny szacuję na 55%.***

- [C6] Klinkowski, M., **Żotkiewicz, M.**, Walkowiak, K., Pióro, M., Ruiz, M., Velasco, L.: Solving large instances of the RSA problem in flexgrid elastic optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking* **8**(5), 320–330 (2016).

DOI 10.1364/JOCN.8.000320. IF=2,261.

Artykuł dotyczył metody przydziału zasobów w elastycznych sieciach optycznych, opartej na podejściu branch and price. Mój wkład w powstanie pracy polegał na weryfikacji założeń, modelu matematycznego i metod optymalizacyjnych wybranych do implementacji przez dra Klinkowskiego, proponowaniu efektywnych sposobów implementacji metod

optymalizacyjnych, zaproponowaniu metody wyznaczania granic dolnych i rozwiązań dopuszczalnych oraz poprawie i edycji tekstu. **Udział własny szacuję na 10%.**

- [C7] Tomaszewski, A., Mycek, M., Pióro, M., **Żotkiewicz, M.**: F2Tx – system optymalizacji światłowodowych sieci dostępowych. Przegląd Telekomunikacyjny **2-3**, 87–90 (2015). DOI 10.15199/59.2015.2-3.11.

*Artykuł dotyczył zaimplementowanej przez nas dla Orange S.A. platformy służącej do optymalizacji sieci FTTH. Mój wkład w projekcie polegał na opracowaniu i implementacji metod optymalizacyjnych wyznaczających: położenie punktów centralnych, w których mają znaleźć się urządzenia operatorskie OLT; położenie szaf kablowych; wyznaczenie tras kablowych; wstępne określenie grubości kabli oraz schematu podziału sygnałów w węzłach sieci. Mój wkład w artykuł polegał na opisie metod optymalizacyjnych, za które byłem odpowiedzialny. **Udział własny szacuję na 20%.***

- [C8] **Żotkiewicz, M.**, Mycek, M., Tomaszewski, A.: Profitable areas in large-scale FTTH network optimization. Telecommunication Systems **61**(3), 591–608 (2016). DOI 10.1007/s11235-015-0016-7. IF=1,542.

*Artykuł dotyczył rozproszonego podejścia do problemu optymalizacji wielkoskalowych dostępowych sieci optycznych. Mój wkład polegał na określeniu koncepcji oraz wyborze metodyki badań, opracowaniu i implementacji metod optymalizacyjnych i eksperymentów oraz współudziale przy formułowaniu wniosków oraz tworzeniu artykułu. **Udział własny szacuję na 80%.***

- [C9] **Żotkiewicz, M.**, Mycek, M.: Impact of demand uncertainty models on FTTH network design (Invited). Proc. International Conference on Transparent Optical Networks, Trydent, Włochy, 2017. DOI 10.1109/ICTON.2016.7550445.

*Artykuł dotyczył wzbogacenia platformy optymalizacyjnej, opisanej w poprzednim artykule, o funkcjonalność związaną z obsługą niepewności w realizacji przewidywanych zapotrzebowań. Mój wkład polegał na określeniu koncepcji oraz wyborze metodyki badań, opracowaniu i implementacji metod optymalizacyjnych i eksperymentów oraz współudziale przy formułowaniu wniosków oraz tworzeniu artykułu. **Udział własny szacuję na 90%.***

- [C10] **Żotkiewicz, M.**, Mycek, M.: Reducing costs of FTTH networks by optimized splitter and OLT card deployment. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking **9**(5), 412–422 (2017). DOI 10.1364/JOCN.9.000412. IF=2,261.

*Artykuł dotyczył racjonalnego wyboru dostępnego sprzętu w trakcie podłączania nowych klientów w sieciach FTTH. Mój wkład polegał na określeniu koncepcji oraz metodyki badań, implementacji metod optymalizacyjnych i eksperymentów a także współudziale przy formułowaniu wniosków oraz pisaniu samego artykułu. **Udział własny szacuję na 90%.***

Niniejszym informuję, że spośród wymienionych wyżej prac żadna nie została zgłoszona jako część innego postępowania habilitacyjnego. Oświadczam też, że żadna z wyżej wymienionych prac nie zawiera wyników badań, przedstawionych w mojej rozprawie doktorskiej, obronionej w 2011 r.

4 Opis osiągnięcia naukowego

Moja praca naukowa, prowadzona w ramach pracy na TELECOM SudParis na stanowisku asystenta naukowego, na Politechnice Warszawskiej na stanowisku asystenta naukowego oraz adiunkta, czy podczas wyjazdów naukowych do Barcelony na Politechnikę Katalońską i do Luksemburga na tamtejszy uniwersytet, dotyczyła różnych aspektów projektowania i optymalizacji sieci. Początkowo były to zagadnienia związane z teoretycznymi właściwościami problemów optymalizacyjnych występujących w telekomunikacji, później także z problematyką dotyczącą projektowania różnego rodzaju sieci teleinformatycznych, zaczynając od kratowych sieci bezprzewodowych (*ang.* Wireless Mesh Networks), poprzez elastyczne sieci optyczne (*ang.* Elastic Optical Network), kończąc zaś na dostępowych sieciach optycznych (*ang.* Fiber to the Home). Wśród badanych problemów znalazły się również różne aspekty algorytmiczne optymalizacji sieci, jak i problemy przydziału zadań do serwerów w centrach danych czy przyporządkowywanie wirtualnych funkcji sieci (*ang.* Virtual Network Functions) do zasobów fizycznych.

Do oceny w procesie habilitacyjnym, jako osiągnięcie naukowe wskazuję cykl publikacji, przedstawiający zagadnienia dotyczące **zaawansowanych metod optymalizacji kombinatorycznej w projektowaniu i zarządzaniu sieciami telekomunikacyjnymi**. Prawidłowe projektowanie sieci telekomunikacyjnych uważam za bardzo istotne ze względu na olbrzymie koszty, jakie pociągają za sobą wdrożenia tych sieci. Badania te prowadzę również obecnie w Zakładzie Sieci i Usług Teleinformatycznych Instytutu Telekomunikacji Politechniki Warszawskiej, realizując projekt finansowany przez Narodowe Centrum Nauki pn. **Otwarte problemy w projektowaniu wielkoskalowych dostępowych sieci optycznych**.

Dla przejrzystości opisu, cykl publikacji podzieliłem na trzy części:

- prace związane z bezprzewodowymi sieciami kratowymi (publikacje [C1–C3¹]),
- prace związane z elastycznymi sieciami optycznymi (publikacje [C4–C6]),
- prace związane z optycznymi sieciami dostępowymi (publikacje [C7–C10]).

Motywnym przewodnim wydzielonych wątków osiągnięcia naukowego są **zaawansowane metody optymalizacji kombinatorycznej w projektowaniu i zarządzaniu sieciami telekomunikacyjnymi**. W przypadku sieci kratowych nacisk położony jest na matematyczne sformułowanie i rozwiązanie rozmaitych problemów przydziału szczelin czasowych transmisjom oraz na technologicznych aspektach tych sieci, jak wykorzystanie anten kierunkowych, czy mechanizm podsłuchiwania transmisji w celu późniejszego niwelowania wynikających z nich interferencji.

W przypadku elastycznych sieci optycznych moje badania skupiały się na statycznym projektowaniu przepływów w takich sieciach oraz na dynamicznym reagowaniu na zaistniałe awarie.

W przypadku optycznych sieci dostępowych moje badania skupiają się na możliwości wdrożeń zaproponowanych rozwiązań projektowania sieci i obejmują podejście heurystyczne do optymalizacji tych sieci oraz metody, biorące pod uwagę niepewność w zachowaniu potencjalnych klientów.

¹W tym rozdziale odnośniki dotyczą pozycji z cyklu publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe, których wykaz zamieszczono w rozdziale 3.

4.1 Prace związane z bezprzewodowymi sieciami kratowymi

Jednym z aspektów projektowania sieci, którym się zajmowałem, był temat optymalizacji bezprzewodowych sieci kratowych. Głównymi celami prowadzonych przeze mnie badań było:

- opracowanie nowych modeli matematycznych przydziału szczelin czasowych oraz wyboru kodowania transmitowanych pakietów,
- zaproponowanie metod zwiększających przepływność w sieci wykorzystujących techniki niwelowania interferencji,
- zbadanie wpływu zastosowania anten kierunkowych na awaryjność bezprzewodowych sieci kratowych.

Opracowanie nowych modeli matematycznych przydziału szczelin czasowych oraz wyboru kodowania transmitowanych pakietów

Badania w dziedzinie bezprzewodowych sieci kratowych rozpocząłem zaraz po obronie doktoratu dołączając do międzynarodowego zespołu pod przewodnictwem prof. Michała Pióro. Wynikiem tej pracy jest opublikowany w 2014 roku (w 2011 roku online) artykuł przedstawiający modele matematyczne umożliwiające optymalizację bezprzewodowych sieci kratowych [C1]. Zespół, poza mną i prof. Michałem Pióro, obejmował dr Barbarę Stachle, dra Dirka Staehle z Uniwersytetu w Würzburgu oraz prof. Di Yuana z Uniwersytetu w Linköping. W wymienionym składzie zmierzaliśmy się z problemem efektywnego rozwiązywania problemów alokacji zasobów w postaci szczelin czasowych dla poszczególnych transmisji. Bezprzewodowe sieci kratowe charakteryzują się nieprzewidywalnością ruchu generowanego przez użytkowników. W związku z tym, w naszych badaniach użyliśmy metody sprawiedliwego podziału zasobów max-min (*ang.* max-min fairness). W pracy rozważane były następujące przypadki:

- przypadek bazowy, tj. jeden schemat kodowania dla każdego z węzłów, każda szczelina czasowa wykorzystywana do transmisji w jednym kierunku, pełny model interferencji,
- możliwość wykorzystania pojedynczej szczeliny czasowej do transmisji w różnych kierunkach,
- wykorzystanie różnych schematów kodowania statycznie przydzielanych do węzłów,
- wykorzystanie różnych schematów kodowania dynamicznie przydzielanych do węzłów,
- wykorzystanie uproszczonego modelu interferencji.

Opracowaliśmy trzy sposoby rozwiązywania postawionych powyżej problemów, zachowując zasadę sprawiedliwego podziału zasobów. Pierwszy sposób polegał na rozwiązaniu programu liniowego całkowitoliczbowego zapisanego w formie kompaktowej. Drugi, efektywniejszy, ale mniej dokładny, polegał na przedstawieniu rozwiązywanych problemów w postaci sformułowań, które nie są kompaktowe, a następnie rozwiązanie ich za pomocą technik generacji kolumn. Trzeci sposób to podejście czysto heurystyczne.

Podejście pierwsze wymaga opisanie rozważanego problemu przy użyciu nierówności liniowych, a następnie rozwiązanie go przy użyciu tzw. solverów MIP (od *ang.* Mixed Integer Programming, czyli programowanie mieszane całkowitoliczbowe). Drugie podejście również polega na zapisaniu problemu w postaci nierówności/równań, ale różni się od pierwszego tym, że kolejne nierówności i zmienne są dodawane do programu w trakcie jego rozwiązywania. Technika ta wymaga zdefiniowania problemu głównego, którego rozwiązanie jest naszym

podstawowym celem, oraz problemu generacji kolumn, którego pewną wersję, zależną od aktualnego rozwiązania problemu głównego, należy rozwiązywać za każdym razem, gdy problem główny wydaje się rozwiązany. Jeżeli problem generacji kolumn nie zwróci przesłanek, że kolejna zmienna powinna być dodana do problemu głównego, to problem główny możemy uznać za rozwiązany, gdyż żadna zmienna, która mogłaby się w nim znaleźć, nie jest w stanie poprawić wyniku optymalizacji. W przeciwnym razie, należy dodać wygenerowaną zmienną do problemu głównego i rozwiązać problem ponownie.

W badaniu, jako generowaną zmienną, potraktowaliśmy czas, w którym nadają tylko i wyłącznie węzły, do których zmienna się odnosi. Zakładając, że liczba węzłów wynosi n , liczba możliwych kombinacji węzłów wynosi $2^n - 1$. W związku z tym, nie możemy umieścić w sformułowaniu wszystkich tych zmiennych od razu, gdyż rozmiar wynikowego problemu uniemożliwiłby jego rozwiązanie. Dlatego też, zmienne te są generowane i dodawane do problemu w trakcie jego rozwiązywania.

Podejście takie jest zdecydowanie szybsze od podejścia pierwszego, które od samego początku bierze pod uwagę wszystkie możliwe kombinacje węzłów poprzez zdefiniowanie zmiennych świadczących o tym, który węzeł nadaje, w której szczelinie czasowej. Minusem metody jest jej mniejsza dokładność – w podejściu drugim czas transmisji przydzielany poszczególnym zestawom węzłów jest ciągły, w podejściu pierwszym możemy określić interesującą nas liczbę szczelin czasowych.

Ostatnie przedstawione w [C1] podejście to dwufazowa metoda heurystyczna. Za jej zaprojektowanie i implementację w całości odpowiedzialny był Uniwersytet w Würzburgu. W związku z tym, w autoreferacie pominę szczegóły tej metody.

Otrzymane rezultaty potwierdzają przewidywaną wysoką złożoność problemów wykorzystujących pełen model interferencji. Dodatkowo wyniki wyraźnie dowodzą oczekiwanej przewagi w kwestii czasu działania podejścia opartego na generacji kolumn nad podejściem opartym na kompaktowym sformułowaniu problemu.

Zaskakującym wynikiem jest nieznacznie krótszy czas rozwiązywania problemów dynamicznego przydziału zasobów niż czas rozwiązywania problemów statycznego przydziału zasobów. Wynika to z faktu, że pierwszy problem da się rozwiązać przy wykorzystaniu metody branch-and-cut, natomiast drugi problem wymaga zastosowania znacznie trudniejszego podejścia branch-and-price ze względu na obecność zmiennych całkowitoliczbowych w problemie głównym.

Pozostałe kwestie zbadane w rozważanej pracy dotyczyły skuteczności zwracanych rozwiązań (przepływności oferowanej klientom) oraz wpływu na czas i jakość rozwiązania następujących składowych: liczby dostępnych schematów kodowania, liczby szczelin czasowych, czy możliwości podziału szczeliny czasowej pomiędzy transmisje w różnych kierunkach.

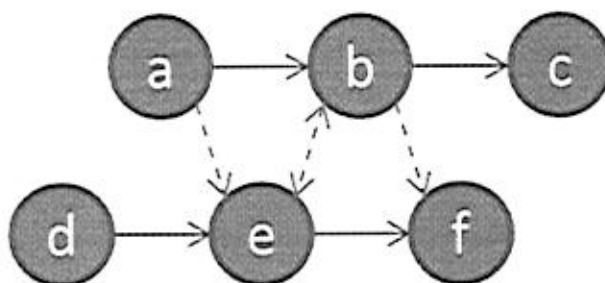
Zaproponowanie metod zwiększających przepływność w sieci poprzez wykorzystanie techniki niwelowania interferencji

Po pierwszej zespołowej publikacji prace w obszarze bezprzewodowych sieci kratowych kontynuowałem samodzielnie. Wynikiem tej pracy był artykuł [C2], w którym rozważam możliwości zwiększenia przepustowości bezprzewodowych sieci kratowych poprzez wykorzystanie wiedzy o podsłuchanych transmisjach. Zaproponowana metoda wykorzystuje idee niwelowania interferencji generowanych przez sygnały znane z innych źródeł. Jeżeli transmitowany sygnał jest znany stacji, nie musi on wcale zagłuszać innych sygnałów również odbieranych przez tę stację, gdyż jego wartość jest z góry znana.

Metodę niwelowania interferencji można wykorzystać na dwa sposoby. Po pierwsze, jeżeli jeden z sygnałów jest znacznie silniejszy od pozostałych, można go zdekodować, a następnie

odjąć przewidywany efekt zdekodowanego sygnału od sumarycznego sygnału odbieranego przez stację. W ten sposób możliwe jest dekodowanie i usuwanie sygnałów jeden po drugim. Zaletą takiego podejścia jest jego uniwersalność — stacja nie musi wiedzieć nic o sygnale, który dekoduje. Wadą natomiast jest stosowalność metody — nadaje się ona tylko do wyluskiwania sygnałów, które są znacznie silniejsze od pozostałych.

W opisywanej pracy zastosowałem odmienne podejście, które zakłada, że stacja zna wyluskiwany sygnał, gdyż wcześniej miała okazję go odebrać (podслуchać). Prosty przykład tego scenariusza przedstawiony jest na Rysunku 2.1. Załóżmy, że węzeł a wysyła pakiet do węzła c , a węzeł d wysyła pakiet do węzła f . Obydwa pakiety muszą zostać przekazane przez węzły pośredniczące, pierwszy przez węzeł b , drugi przez węzeł e . Na Rysunku 2.1 strzałki nieprzerywane przedstawiają kierunki możliwych transmisji. Natomiast strzałki przerywane reprezentują interferencje, np. jeżeli a transmituje do b , to w tym czasie d nie może transmitować do e , gdyż transmisja z a zagłuszy transmisję z d . W związku z tym, przekazanie obydwu pakietów wymaga użycia czterech szczelin czasowych, gdyż żadna z niezbędnych transmisji nie może być zrealizowana jednocześnie z inną przewidzianą transmisją ze względu na interferencje. W opisanym przypadku techniki niwelacji interferencji można użyć w następujący sposób. W pierwszej szczeliny czasowej a transmituje pakiet do b , ale jednocześnie pakiet zostaje podsłuchany przez e . W drugiej szczeliny czasowej b przekazuje pakiet do c , a d nadaje do e . W tej szczeliny e odbiera dwa sygnały, właściwy od d oraz interferujący od b . Pomimo że obydwie sygnały zakłócają się nawzajem, d jest w stanie poprawnie zdekodować. Zawartość pakietu wysłanego przez b jest mu znana, gdyż wcześniej podsłuchał transmisję pomiędzy a a b . Jest więc w stanie odtworzyć sygnał generowany przez b i odjąć go od odbieranego sumarycznego sygnału. Po odjęciu sygnału, węzeł e jest już w stanie zdekodować pakiet wysłany przez d . W trzeciej szczeliny czasowej e wysyła pakiet do f i obydwie pakiety docierają do celu wykorzystując jedynie trzy szczeliny czasowe.



Rysunek 2.1: Przykładowa sieć ilustrująca idee niwelowania interferencji.

W pracy przedstawiony jest model matematyczny pozwalający na optymalizację przydziału szczelin czasowych transmisjom w sieci, która wykorzystuje przedstawioną technikę niwelacji interferencji. Optymalizując sieć z wykorzystaniem przedstawionego modelu matematycznego oraz modelu matematycznego, który nie umożliwia wykorzystania technik niwelacji interferencji, możemy porównać przepustowości otrzymane w obydwu przypadkach. Moje wyniki pokazują, że w około 20% przypadków techniki niwelacji interferencji pozwoliły na uzyskanie lepszych wyników. Interesującym jest fakt, że średni zysk dla tych 20% przypadków wynosi około 40%. Pokazuje to, że techniki niwelacji interferencji mogą istotnie zwiększyć przepustowość bezprzewodowych sieci kratowych.

Dodatkowo w przedstawionej pracy zaproponowałem trzy dodatkowe nierówności, które zwiększają efektywność zaproponowanych modeli matematycznych. Uzyskane wyniki pokazują, że zastosowanie zaproponowanych nierówności zmniejsza czas optymalizacji od kilku do

kilkudziesięciu procent, w zależności od przypadku testowego.

Zbadanie wpływu zastosowania anten kierunkowych na awaryjność bezprzewodowych sieci kratowych

Mój kolejny obszar badań nad bezprzewodowymi sieciami kratowymi obejmował ich awaryjność. W publikacji [C3], która jest rozszerzoną wersją artykułu zaprezentowanego na konferencji International Workshop on Reliable Networks Design and Modeling w Budapeszcie w 2011 roku [52], wraz z prof. Michałem Pióro zmierzaliśmy się z problemem minimalizacji kosztów bezawaryjnych bezprzewodowych sieci kratowych zbudowanych z anten kierunkowych. W badaniach tych przedstawiamy dwa modele matematyczne. Pierwszy z nich pozwala na optymalizację kierowania ruchem i przydziału szczelin czasowych dla niezabezpieczonej (awaryjnej) sieci zbudowanej z anten dookólnych. Otrzymane przepływności wynikające z użycia pierwszego modelu są dla nas punktem odniesienia dla minimalizacji kosztów z wykorzystaniem modelu drugiego, który rozszerza rozważane zagadnienie optymalizacyjne o kwestie związane z bezawaryjnością i wykorzystaniem anten kierunkowych. Wykorzystując drugi model poszukujemy takiego zbioru anten kierunkowych oraz takiego przydziału szczelin czasowych do transmisji, które zminimalizują koszt sieci przy jednoczesnym zapewnieniu, że będzie ona odporna na pojedyncze awarie dowolnej z zainstalowanych anten.

W badaniach wykorzystujemy uproszczony model interferencji, w którym wszystkie możliwe interferencje pomiędzy węzłami modelowane są za pomocą krawędzi w grafie konfliktów. W tak uproszczonym modelu niemożliwym jest wzięcie pod uwagę sytuacji, w których dwie jednoczesne transmisje zakłócają transmisję trzecią, jeżeli żadna z tych dwóch transmisji nie jest w stanie samodzielnie zakłócić transmisji trzeciej. Pomimo że zaproponowany model uproszczony nieznacznie odbiega od rzeczywistości, zdecydowaliśmy się go wykorzystać z dwóch powodów. Po pierwsze wykorzystanie modelu uproszczonego znacznie przyspiesza obliczenia. Po drugie w środowisku wykorzystującym anteny kierunkowe znacznie rzadziej zdarzają się sytuacje pomijane przez model uproszczony ze względu na istotnie zmodyfikowane schematy rozchodzenia się sygnałów.

Wykorzystując graf konfliktów do reprezentacji interferencji, zamodelowanie uniemożliwienia nadawania dwóm wzajemnie zakłócającym się węzłom polega na wygenerowaniu ograniczenia dla każdej maksymalnej klik w grafie konfliktów. Biorąc pod uwagę, że liczba maksymalnych klik w grafie rośnie wykładniczo wraz z rozmiarem grafu, narzucającym się rozwiązaniem jest generowanie istotnych klik wraz z postępami w rozwiązywaniu zadania. Podejście to ma jedną istotną wadę – problem wygenerowania największej klikki jest równie skomplikowany jak problem wygenerowania wszystkich klik. Dodając do tego wyniki naszych wstępnych badań, w których około 30% wszystkich maksymalnych klik musi zostać dodanych do problemu zanim znajdziemy rozwiązanie optymalne, zdecydowaliśmy się na podejście zachłanne, w którym zamiast generować nowe klikki maksymalne, wyliczamy i dodajemy do problemu wszystkie maksymalne klikki na samym początku rozwiązywania problemu.

Nasze obserwacje pokazują, że aby zapewnić minimalną odporność na awarie wszystkim klientom, potrzebujemy średnio 34% więcej anten niż w przypadku, w którym odporność na awarie nie jest zapewniona. Dodatkowo, żeby zapewnić pełną odporność na awarie pojedynczych anten, niezbędnym jest zwiększenie liczby anten średnio o 80%.

4.2 Prace związane z elastycznymi sieciami optycznymi

W latach 2012-2015 nasz zespół zaangażował się w realizację europejskiego projektu IDEALIST – Industry-Driven Elastic and Adaptive Lambda Infrastructure for Service and Trans-

port Networks finansowanym w ramach 7. Programu Ramowego, a dotyczącego elastycznych sieci optycznych. W ramach projektu ściśle współpracowaliśmy z Politechniką Katalońską. Wynikiem współpracy były trzy artykuły opublikowane w czasopiśmie z listy JCR [C4-C6]. Jeden z nich, tj. [C5], powstała w trakcie mojego pobytu w Department of Computer Architectures na Politechnice Katalońskiej w okresie 01.04–30.06.2013.

Metody statycznego przydziału zasobów w elastycznych sieciach optycznych

Prace w temacie elastycznych sieci optycznych rozpoczęliśmy od statycznych metod przydziału zasobów. W artykule [C4] opisaliśmy metodę przydziału zasobów opartą na technikach generacji kolumn. Technika ta umożliwia rozwiązywanie problemów zapisanych w postaci niekompaktowej, tj. z wykładniczą liczbą potencjalnych zmiennych. Wykorzystując technikę generacji kolumn jesteśmy w stanie ograniczyć problem tylko do niezbędnych zmiennych poprzez cykliczne rozwiązywanie podproblemu, który pokazuje zmienne, o które należy problem główny rozszerzyć. Jeżeli rozważany podproblem nie ma rozwiązania, zbiór wygenerowanych zmiennych jest wystarczający, aby optymalnie rozwiązać problem główny.

W artykule [C4] przedstawiliśmy rozważany problem przydziału zasobów w elastycznych sieciach optycznych. Następnie sformułowaliśmy problem w postaci niekompaktowej oraz przedstawiliśmy podproblem wskazujący niezbędne zmienne, które w rozważanym przypadku odpowiadają ścieżkom. Kolejnym krokiem było zaproponowanie algorytmu, który efektywnie rozwiązywałby problem generacji ścieżek. Algorytm przedstawiony w [C4] opiera się na spostrzeżeniu, że zredukowany koszt ścieżek zmniejsza się wraz ze wzrostem rozmiaru użytych kanałów. W związku z tym, zaproponowany przez nas algorytm przeszukuje wszystkie możliwości, zaczynając od najszerszych kanałów. W artykule szczegółowo opisane zostały składowe zaproponowanej metody oraz zbadane zostały następujące aspekty wydajnościowe przedstawionego podejścia:

- czas działania metody w zależności od natężenia ruchu,
- liczba wygenerowanych ścieżek w zależności od natężenia ruchu,
- wpływ wstępnego wyboru ścieżek na efektywność metody.

Należy zauważyć, że w artykule [C4] wykorzystaliśmy technikę generacji kolumn jedynie w trakcie rozwiązywania relaksacji liniowej problemu bazowego w korzeniu drzewa B&B (ang. branch and bound). Metodę tę rozszerzyliśmy w artykule [C6] na wszystkie węzły drzewa B&B. Podejście to znane jest pod nazwą B&P (ang. branch and price) i wymaga niestandardowego wykorzystania solverów MIP. W przypadku rozważanego problemu zastosowanie omawianego podejścia wymagało dokładnego przyjrzenia się następującym aspektom zadania:

- wyznaczenie dolnej granicy w węźle,
- wyznaczenie rozsądnego rozwiązania dopuszczalnego,
- wybór zmiennej do podziału,
- wybór węzła do podziału.

Standardowo w metodzie B&P dolną granicę w węźle wyznacza się przez wykorzystanie w tym celu relaksacji liniowej problemu. W naszym podejściu wykorzystaliśmy relaksację problemu, w której zmienne całkowitoliczbowe pozostały, ale wymaganie ciągłości alokacji widma zostało usunięte. Dodatkowo podejście zostało wzbogacone o płaszczyzny tnące wygenerowane na podstawie klik potencjalnych ścieżek, w których każda z par ścieżek ma co najmniej

jedno łącze wspólne. Podejście to, pomimo większej złożoności niż standardowa relaksacja liniowa, pozwalało na uzyskanie mniejszych całkowitych czasów działania metody poprzez istotne podniesienie wyliczonych granic dolnych w węzłach drzewa B&P, co z kolei skutkowało mniejszą liczbą węzłów B&P do rozważenia. Do wyznaczania rozwiązań dopuszczalnych użyliśmy algorytmu opartego na symulowanym wyżarzaniu. Podziału w węzłach dokonywaliśmy na dwa sposoby, tj. dla konkretnego zapotrzebowania albo wymuszaliśmy/zabranialiśmy wykorzystania konkretnej ścieżki, albo wymuszaliśmy/zabranialiśmy wykorzystania konkretnego segmentu widma na konkretnej ścieżce. Do podziału wybieraliśmy węzeł, który charakteryzował się najniższą granicą dolną, a jednocześnie wygenerowane w nim rozwiązanie dopuszczalne zyskiwało najwięcej w stosunku do rozwiązania dopuszczalnego wygenerowanego w jego przodku. Otrzymane przez nas wyniki wskazują, że zaprezentowana metoda w rozsądnym czasie potrafi wygenerować wyniki optymalne, bądź bliskie optymalności, dla problemów o rozmiarach spotykanych w praktyce telekomunikacyjnej.

Dynamiczna rekonfiguracja elastycznych sieci optycznych

W artykule [C5] zmierzaliśmy się z problemem nieefektywnego wykorzystania widma w elastycznych sieciach optycznych. W trakcie użytkowania sieci ciągle napływ i odpływ zapotrzebowań powoduje, że widmo dostępne na poszczególnych łączach zaczyna być wykorzystywane nieefektywnie ze względu na narastającą w trakcie użytkowania sieci fragmentację dostępnych zasobów. Sytuację dodatkowo komplikują awarie, które wymuszają rekonfigurację uszkodzonych ścieżek, skutkującą zmniejszeniem wydajności wykorzystania dostępnych zasobów. W związku z tym w artykule [C5] przedstawiliśmy metodę rekonfiguracji sieci po usunięciu awarii. Zaproponowana metoda wyznacza zbiór zapotrzebowań, które należy przekonfigurować po usunięciu awarii, aby wydajność sieci była jak największa. Cały proces składa się z trzech etapów:

- wybór potencjalnie interesujących zapotrzebowań,
- rozwiązanie problemu optymalizacyjnego,
- wyznaczenie kolejności rekonfiguracji zapotrzebowań.

Pierwszy etap – to wybór zbioru interesujących nas zapotrzebowań. W artykule [C5] zaproponowaliśmy dwie metody rozwiązujące ten problem. Pierwsza z nich za interesujące uznawała wszystkie zapotrzebowania, których rekonfiguracja może zwiększyć wydajność wykorzystania sieci. Należy zwrócić tutaj uwagę, że pojedyncza rekonfiguracja zapotrzebowania nie musi samodzielnie zwiększać wydajności wykorzystania sieci aby znaleźć się w omawianym zbiorze. Może natomiast umożliwić zwiększenie wydajności poprzez zwolnienie zasobów, które wykorzystają inne zapotrzebowania. Fakt ten powoduje, że zaproponowana przez nas metoda oznacza stosunkowo dużą liczbę zapotrzebowań zasługujących na uwagę. Podejście to jest poprawne z teoretycznego punktu widzenia, ale w praktyce, aby zwiększyć wydajność metody, możemy zrezygnować z zapotrzebowań, które tylko pośrednio mogą wpłynąć na zwiększenie wydajności wykorzystania sieci. Tą zasadą kieruje się druga przedstawiona przez nas w artykule metoda, która za warte uwagi uznaje tylko te zapotrzebowania, których rekonfiguracja może bezpośrednio zmniejszyć liczbę wykorzystanych zasobów.

Drugi etap – to rozwiązanie powstałego problemu optymalizacyjnego, który zapisujemy w postaci programu całkowitoliczbowego i rozwiązujemy wykorzystując metodę generacji kolumn. Interesującym aspektem naszego podejścia jest sposób generacji nowych ścieżek. Zamiast sprawdzać każdy możliwy fragment widma dla każdego z zapotrzebowań, stosujemy

algorytmiczną sztuczkę, który pozwala nam uniezależnić czas trwania algorytmu generacji ścieżek od liczby zapotrzebowań. W ten sposób istotnie zmniejszamy całkowity czas działania zaproponowanej metody.

Ostatnim, trzecim etapem metody jest wyznaczenie kolejności rekonfiguracji wyznaczonych zapotrzebowań w sposób, który minimalizuje czas całej operacji. W tym celu wykorzystujemy algorytm heurystyczny, który minimalizuje długość najdłuższego łańcucha rekonfiguracji wykonywanych jedna po drugiej.

Nasze badania pokazują, że zaprezentowana metoda działa wystarczająco szybko, aby mogła być wykorzystana w praktyce. Zaletą jej stosowania jest zmniejszenie prawdopodobieństwa zablokowania sieci o ponad 10% w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Dodatkowo pokazujemy, że wykorzystanie metody można ograniczyć do jedynie 60% najistotniejszych łączy, aby uzyskać znaczący spadek prawdopodobieństwa zablokowania sieci.

4.3 Prace związane z optycznymi sieciami dostępowymi

W roku 2011 zaczęliśmy realizować w Instytucie projekt przemysłowy we współpracy z Orange S.A.. Wynikiem tych prac jest w pełni funkcjonalny system służący do optymalizacji optycznych sieci dostępowych FTTH (*ang.* Fiber to the Home). Tematykę projektowania i optymalizacji sieci FTTH kontynuowałem realizując dwa projekty naukowe, jeden finansowany z programu Iuventus Plus MNiSW, drugi z programu Sonata NCN. Moje badania skupiały się na następujących obszarach:

- zaproponowanie przemysłowych rozwiązań do problemu projektowania sieci FTTH,
- analiza potencjalnych możliwości minimalizacji kosztów sieci FTTH,
- aspekty niepewności w projektowaniu sieci FTTH,
- aspekty niepewności we wdrażaniu i użytkowaniu sieci FTTH.

Zaproponowanie przemysłowych rozwiązań do problemu projektowania sieci FTTH

Jak wcześniej wspomniałem, badania dotyczące optycznych sieci dostępowych rozpocząłem w trakcie realizacji projektu przemysłowego finansowanego przez Orange S.A. realizowanego w zespole pod kierownictwem prof. Michała Pióro. W zespole, w którym pracowali jeszcze dr hab. Artur Tomaszewski i dr Mariusz Mycek, odpowiedzialny byłem za opracowanie i implementację metod optymalizacyjnych wyznaczających: położenie punktów centralnych, w których mają znaleźć się urządzenia operatorskie OLT (*ang.* Optical Line Termination); położenie szaf kablowych; wyznaczenie tras kablowych; wstępne określenie grubości kabli oraz schematu podziału sygnałów w węzłach sieci. Metodologię użytą do rozwiązania napotkanych problemów optymalizacyjnych można nazwać metodami heurystycznymi opartymi na modelach programowania całkowitoliczbowego. Udaną współpracę podsumowaliśmy w artykule [C7], w którym opisaliśmy funkcjonalność dostarczonego rozwiązania.

Analiza potencjalnych możliwości minimalizacji kosztów sieci FTTH

Badania nad optymalizacją dostępowych sieci optycznych kontynuowałem pełniąc rolę kierownika projektu „Rozproszona optymalizacja optycznych sieci dostępowych” finansowanego przez MNiSW w ramach programu Iuventus Plus. W ramach projektu zaproponowałem rozproszone podejście do problemu optymalizacyjnego zdefiniowanego w trakcie współpracy

z Orange S.A. Zaprojektowane i zaimplementowane podejście różniło się od podejścia opisanego w poprzednim punkcie nie tylko skutecznym rozproszeniem obliczeń, co przekładało się na wydajność rozwiązania, ale również rezygnacją z wykorzystania komercyjnych solverów programowania liniowego, co z kolei istotnie zmniejszało potencjalne koszty przemysłowego wykorzystania zaproponowanego rozwiązania. Zbudowana platforma optymalizacyjna została opisana w artykule [C8].

W zaproponowanej metodzie optymalizacyjnej problem został podzielony na cztery pod-problemy:

- wybór lokalizacji OLT i szaf kablowych,
- wyznaczenie tras kablowych dla odcinków magistralnych,
- wyznaczenie tras kablowych dla odcinków rozdzielczych,
- wybór schematów podziału sygnału dla każdego z punktów dostępowych.

Każdy z tych podproblemów był rozwiązywany metodą symulowanego wyżarzania przy wykorzystaniu wielu niezależnych wątków, które wymieniały się informacjami i znalezionymi rozwiązaniami tylko wtedy, gdy najlepsze rozwiązania znalezione przez jeden wątek wyraźnie odstawało jakością (w dowolną stronę) od najlepszych rozwiązań znalezionych przez pozostałe wątki. Inną charakterystyczną cechą metody był sposób traktowania aspektów rozwiązania, które jeszcze nie zostały zoptymalizowane, np. jak wziąć pod uwagę koszt tras kablowych, optymalizując lokalizację szaf kablowych, czy jaki wpływ na realny koszt tras kablowych ma wybór schematów podziału sygnału w punktach dostępowych. Zwyczajowe podejście do problemów o podobnej klasie złożoności polega na rozpoczęciu optymalizacji od stosunkowo prostego modelu świata i stopniowe komplikowanie go wraz z rozpoczynaniem kolejnych etapów optymalizacji. Na przykład, wyznaczając lokalizację OLT możemy całkowicie zapomnieć o problemie rozdzielaczy sygnałów, a kable traktować tak, jakby ich możliwa krotność włóknowa była ciągła. W zaproponowanej metodzie każdy z aspektów, który nie był jeszcze optymalizowany, nie jest upraszczany – złożoność modelu zostaje stała na wszystkich etapach optymalizacji.

Zamiast upraszczać model, zaproponowałem podejście polegające na użyciu prostych metod inżynierskich do wyznaczenia wartości zmiennych, które jeszcze nie podlegały optymalizacji. Na przykład wyznaczając trasy kablowe stosuję proste (charakteryzujące się liniowym czasem wykonania) algorytmy, które w każdym punkcie dostępowym instalują rozdzielacze sygnału w taki sposób, że ich liczba jest jak najmniejsza, a jednocześnie żaden z nich nie jest wykorzystywany w mniej niż 70%. Z drugiej strony, wyznaczając lokalizację OLT wykorzystuję nie tylko wspomniane algorytmy instalujące rozdzielacze sygnału, ale również błyskawiczne heurystyki wyznaczające minimalne drzewa Steinera w celu określenia tras kablowych. Podejście takie znacznie zwiększa czas oceny pojedynczego rozwiązania w metodzie symulowanego wyżarzania, ale z drugiej strony, znacząco zwiększa jakość oceny kosztu tych rozwiązań.

W artykule [C8] zaprezentowana platforma została użyta do oceny: które fazy projektowania sieci FTTH mogą przynieść najlepsze efekty. Nasze wyniki wykazały, że wbrew powszechnej opinii, w środowisku miejskim projektanci sieci FTTH nie powinni się skupiać na doborze tras kablowych, a więcej uwagi poświęcić optymalizacji lokalizacji OLT oraz wyborowi schematów podziału sygnałów. Analizy pokazują, że oczywiście większość kosztów budowy sieci FTTH stanowią kable (koszt zakupu i rozwinięcia), ale ograniczone możliwości w wyborze potencjalnych tras kablowych oraz wydajność dostępnych algorytmów heurystycznych rozwiązujących problem minimalnego drzewa Steinera, nie zostawiają wiele pola do dalszej

minimalizacji tych kosztów. Inaczej się ma rzecz z rozdzielaczami sygnałów. Bezpośrednio nie wpływają one istotnie na koszt sieci FTTH, ale pośrednio mają zasadniczy wpływ na liczbę zainstalowanych kart OLT, czy grubość rozwijanych kabli. Nasze badania dowodzą, że skupiając wysiłek na doborze schematów podziału sygnału możemy znacznie bardziej obniżyć koszt sieci niż poprzez wykorzystanie porównywalnych zasobów na optymalizację tras kablowych.

Aspekty niepewności w projektowaniu sieci FTTH

Po zrealizowaniu projektu „Rozproszona optymalizacja optycznych sieci dostępowych” przez pewien czas zawiesiłem badania nad sieciami dostępowymi. Do tematu wróciłem w roli kierownika projektu „Otwarte problemy w projektowaniu wielkoskalowych dostępowych sieci optycznych” finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki w ramach programu Sonata. Jednym z obszarów badań przewidzianych w projekcie jest aspekt niepewności, do którego podeszliśmy w dwojaki sposób: na etapie projektowania sieci oraz na etapie wdrażania sieci.

Naszym pierwszym krokiem było wzbogacenie platformy optymalizacyjnej, stworzonej w ramach poprzedniego projektu o funkcjonalność związaną z obsługą niepewności w realizacji przewidywanych zapotrzebowań. W tym celu skorzystaliśmy z koncepcji klientów wirtualnych. Przemysłowe podejście do wdrażania sieci FTTH zakłada, że około 30% potencjalnych klientów zdecyduje się na zakup usługi. Problem leży w nieprzewidywalności rozkładu tych 30% — w wystarczająco dużym przedsięwzięciu spotkamy się zarówno z budynkami, w których uda się sprzedać usługę wszystkim mieszkańcom, jak i budynkami, w których nikt nie będzie zainteresowany proponowaną przez nas usługą. Dodatkowo biorąc pod uwagę fakt, że czas budowy sieci jest stosunkowo długi i nie da się jej łatwo rozbudowywać, należałoby budować sieci, które będą w stanie obsłużyć nawet najbardziej nieprawdopodobne scenariusze zachowania klientów, czyli 100% podłączonych potencjalnych klientów. W związku z tym, wydawać by się mogło, że problem niepewności w projektowaniu sieci FTTH nie istnieje, gdyż zawsze należy budować sieć mogącą obsłużyć wszystkich potencjalnych klientów. Oczywiście jest to odczucie błędne, gdyż niektóre elementy sieci FTTH, jak rozdzielacze sygnału zlokalizowane w szafach kablowych, czy karty OLT, mogą być łatwo instalowane w sieci w trakcie jej działania, więc instaluje się je tylko w odpowiedzi na zapotrzebowania. W związku z tym, sieć zoptymalizowana pod konkretną najbardziej prawdopodobną liczbę klientów będzie znacznie tańsza w realizacji od innych projektów sieci, jeżeli rzeczywista liczba klientów będzie równa liczbie przewidywanej.

Do rozwiązania opisywanego problemu optymalizacyjnego wykorzystałem koncepcję klientów wirtualnych, która polega na podziale wszystkich potencjalnych klientów na tych, którzy najprawdopodobniej się pojawią i klientów wirtualnych, na których raczej nie powinniśmy liczyć. Mając dwa podzbiory klientów przeprowadzamy optymalizację, której celem jest minimalizacja sumy kosztów kabli niezbędnych do obsługi wszystkich klientów. Natomiast koszty sprzętu aktywnego (kart OLT) i rozdzielaczy mocy ograniczamy do tych, które niezbędne są do obsługi klientów prawdopodobnych.

Powyższe zagadnienie oraz wnioski płynące z jego rozwiązania przedstawiliśmy w artykule [C9]. Głównym celem artykułu było pokazanie wpływu wykorzystania różnych sposobów reprezentacji niepewności w liczbie klientów na całkowity koszt wdrożenia sieci FTTH. W tym celu posłużyliśmy się opisaną poniżej metodologią.

Na początku generujemy pewną liczbę planów sieci, wykorzystując w tym celu platformę optymalizacyjną stworzoną w ramach projektu MNiSW, wzbogaconą o funkcjonalność wirtualnych rozdzielaczy sygnałów oraz ograniczeń, które powinny być spełnione z określonym prawdopodobieństwem. Otrzymane plany sieci zawierają pewne obowiązkowe elementy, które muszą zostać wybudowane bez względu na liczbę klientów (punkty centralne i dystrybucyjne,

kable magistralne i rozdzielcze), oraz elementy opcjonalne (rozdzielacze sygnałów, karty OLT). W kolejnym kroku dokonujemy pewnej liczby symulacji, aby dowiedzieć się, jaki jest średni koszt zaproponowanych rozwiązań dla przewidywanych scenariuszy zachowań klientów.

Uzyskane wyniki pokazują, że poprawne użycie metody opartej na wirtualnych rozdzielaczach sygnału pozwala zaoszczędzić do 15% kosztów elementów opcjonalnych. Jednakże metoda wymaga prawidłowo określonych modeli rozkładu prawdopodobieństw liczby użytkowników w punktach dostępowych. Jeżeli dane nie są poprawne, optymalizacja traci swój sens.

Aspekty niepewności we wdrażaniu i użytkowaniu sieci FTTH

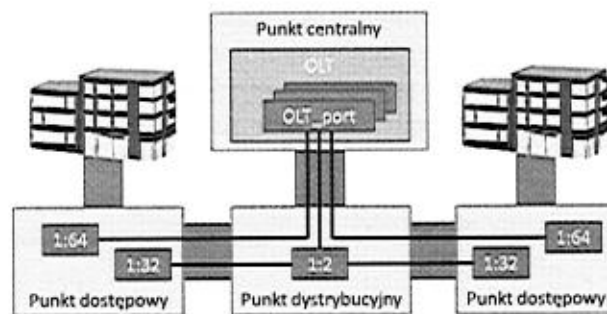
W prawidłowo wdrażanej sieci FTTH koszty CAPEX rozłożone są pomiędzy fazę budowy sieci, kiedy budowane są szafy kablowe oraz rozwijane są kable magistralne oraz rozdzielcze, oraz fazę eksploatacji sieci, kiedy klienci decydujący się na zakup usługi są dołączani na bieżąco. Zakładamy, że projektowanie sieci następuje przed fazą pierwszą, a otrzymany projekt realizowany jest w obydwu fazach. W związku z tym w fazie drugiej nie ma już miejsca na radykalne zmiany w projekcie, gdyż skutkować by one mogły niedostępnością sygnału dla niektórych klientów. W ostatniej pracy cyklu, tj. [C10], zauważam, że nawet sztywno trzymając się zoptymalizowanego planu sieci opracowanego przed fazą pierwszą, ciągle jesteśmy w stanie zaoszczędzić istotne kwoty poprzez racjonalny wybór dostępnego sprzętu w trakcie podłączania nowych klientów.

Mechanizm ten można wytłumaczyć posługując się prostym przykładem graficznie przedstawionym na Rysunku 2.2. Rozważmy dwa 80-rodzinne bloki mieszkalne, które stoją w nieznacznej odległości od siebie. Załóżmy, że przewidywane obłożenie wynosi 50%. W związku z tym, w każdym bloku zaplanowany został rozdzielacz 1:64 do obsługi prawdopodobnych klientów. Dodatkowo do każdego z bloków doprowadzono jedno włókno światłowodowe wykorzystujące rozdzielacz 1:2 w punkcie dystrybucyjnym, których celem jest obsłużenie ewentualnych, ale mało prawdopodobnych, klientów, których nie dałoby się już obsłużyć przewidzianymi rozdzielaczami 1:64. Jeżeli kampania reklamowa została przeprowadzona w jednym z budynków wcześniej, okazać by się mogło, że zamiast przewidywanych 40 klientów, udało nam się podłączyć 65 klientów. Takie rozwiązanie wymagałoby podłączenia dwóch portów OLT w punkcie centralnym, a co za tym idzie, dałoby możliwość stosunkowo taniego podłączenia 32 klientów w drugim budynku.

W zaistniałej sytuacji stajemy przed dylematem: czy w drugim budynku w pierwszej instalujemy rozdzielacz 1:32 i liczymy, że więcej niż 32 klientów się nie zgłosi, czy instalujemy od razu rozdzielacz 1:64. Warto tutaj zauważyć, że jeżeli w drugim budynku również zgłosi się 65 klientów lub więcej, wtedy musimy zainstalować cały przewidziany sprzęt i żadna optymalizacja nie jest w stanie zminimalizować poniesionych kosztów.

W artykule formalizujemy nakreślony wyżej problem oraz przedstawiamy efektywny sposób jego rozwiązania oparty na programowaniu całkowitoliczbowym. Nasza metoda polega na minimalizacji średnich ostatecznych kosztów podłączenia przewidywanej liczby klientów dla małego podzbioru prawdopodobnych stanów końcowych.

Wracając do zaprezentowanego przykładu, jeżeli optymalizowalibyśmy decyzje podejmowane w drugim budynku, zakładając jeden najbardziej prawdopodobny stan końcowy, tj. 50% obłożenia, czyli 40 klientów, zdecydowalibyśmy się na rozdzielacz 1:64. Z drugiej strony, jeżeli rozważymy trzy prawdopodobne scenariusze: 30 klientów, 40 klientów i 50 klientów, decyzją minimalizującą przewidywany koszt inwestycji byłaby instalacja rozdzielacza 1:32. Decyzja ta w 67% skończyłaby się nieznaczną stratą, tj. instalacją dwóch rozdzielaczy zamiast jednego, ale w pozostałych 33% decyzja umożliwiłaby oszczędzenie jednego portu OLT, którego koszt



Rysunek 2.2: Przykładowa sieć pokazująca możliwe oszczędności przy podłączaniu nowych klientów

znacznie przewyższa koszty rozdzielaczy.

W artykule pokazujemy, że zaproponowana przez nas metoda jest skuteczniejsza zarówno od podejścia zachłannego, jak i podejścia wykorzystującego centroid możliwych końcowych stanów zapotrzebowań. Co więcej, z przemysłowego punktu widzenia, metoda nie jest zbyt skomplikowana obliczeniowo.

5 Opis pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

W niniejszym rozdziale zamieściłem informacje o najważniejszych osiągnięciach naukowo-badawczych dokonanych po uzyskaniu stopnia doktora, innych niż te, które stanowią osiągnięcie naukowe opisane w rozdziałach 2–4. Za najważniejsze osiągnięcia uważam te, które udało się upublicznić na łamach czasopism z listy JCR. W przeważającej większości prace dotyczyły różnych aspektów projektowania szkieletowych sieci telekomunikacyjnych. W tym rozdziale i następujących odsyłacze dotyczą pozycji literatury zamieszczonych w wykazie dorobku w Załączniku 4.

Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora kontynuowałem pracę w obszarze rozmaitych problemów algorytmicznych, wynikających z potrzeby uodparniania sieci telekomunikacyjnych na awarie. Przed uzyskaniem stopnia doktora wraz z prof. Walidem Ben-Ameurem oraz prof. Michałem Pióro przedstawiliśmy wielomianowy algorytm wyznaczania najkrótszych par rozłącznych ścieżek, które mogą dzielić między siebie niektóre łącza, z zastrzeżeniem, że koszt dzielonych łączy brany jest pod uwagę tylko raz [16]. Problem ten, już po uzyskaniu przeze mnie stopnia doktora, rozszerzyliśmy do problemu poszukiwania najtańszego rozplywu ruchu, który korzysta z tak kosztowanych par ścieżek. Problem ten również rozwiązuje się w czasie wielomianowym, co pokazaliśmy w [10].

Kolejny problem z rozważanej klasy rozwiązywałem wspólnie z Teresą Gomes z Uniwersytetu w Coimbrze, która trafia na nasze prace w trakcie budowy elementu obliczającego ścieżki (*ang.* Path Computation Element PCE) na potrzeby projektu PT Inovação R&D Project „End to end Protection considering SRLGs – II”. Zaproponowanej przez dr. Gomes wersji problemu nie udało się rozwiązać w czasie wielomianowym, ale przedstawiony przez nas algorytm generował opóźnienia, które były do zaakceptowania z przemysłowego punktu widzenia. Algorytm ten został opublikowany w [9].

Swego rodzaju odnogą prac na temat algorytmów projektowania sieci były prace na temat złożoności napotykaných problemów optymalizacyjnych. W pracy [13], głównie za sprawą dra Dritana Nace z Uniwersytetu w Compiègne, pokazaliśmy przykład problemu wielomianowego, dla którego problem generacji ścieżek ma wykładniczą złożoność. Współpracę z ośrodkiem

w Compiegne kontynuowaliśmy przenosząc się na obszary dynamicznej rekonfiguracji sieci w odpowiedzi na awarie. Wynikiem tej współpracy był między innymi artykuł opublikowany w czasopiśmie Networks [6] traktujący o elastycznym kierowaniu ruchem, którego celem jest dynamiczna zmiana konfiguracji sieci w przypadku wykrycia awarii.

W okresie 01.03 – 31.05.2015 brałem udział w stażu zagranicznym w Computer Science and Communications Research Unit na Uniwersytecie w Luksemburgu. Pobyt ten zaowocował publikacją w czasopiśmie IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems [3] oraz zacieśnieniem kontaktów badawczych w dziedzinie przydziału zasobów w centrach danych.

Pozostałe wykazane przeze mnie prace opublikowane w czasopismach z listy JCR, tj. [17, 15, 14, 12], były albo opublikowane przed uzyskaniem przeze mnie stopnia naukowego doktora [17, 15, 14], albo ich zawartość merytoryczna w dużej mierze pokrywała się z moją rozprawą doktorską [12].

