AKADEMIA GÓRNICZO–HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji

INSTYTUT TELEKOMUNIKACJI

Dr hab. inż. Piotr CHOŁDA, prof. AGH

Kraków, dn. 19 maja 2025 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: Optimizing Critical Function Placement to Ensure Resilient Network Services — Selected Problems
Autor rozprawy: mgr inż. Dariusz Nogalski

1. WSTĘP

Anglojęzyczna rozprawa pod tytułem "**Optimizing Critical Function Placement to Ensure Resilient Network Services — Selected Problems**" autorstwa pana mgr. inż. Dariusza Nogalskiego, przygotowana pod opieką promotorską pana dr hab. Konstantego Junoszy Szaniawskiego oraz z opieką promotora pomocniczego pana dra Mariusza Mycka, obejmuje 130+xiii stron tekstu. W jej skład wchodzą cztery rozdziały: wprowadzający "1. Introduction" (str. 1-12) oraz trzy rozdziały poświęcone poszczególnym studiom opracowanym przez Autora, tj. "2. Robust Controller Placement" (str. 13-47), "3. Traffic Sentinel Placement" (str. 48-71), "4. Multi-Domain Service Function Chain Placement (str. 72-106). Brak wyróżnionego rozdziału podsumowującego całość tekstu. Rozprawa jest uzupełniona standardowymi elementami typu streszczenia w języku angielskim i polskim, spis treści na początku; lista pozycji bibliograficznych, listy skrótów, rysunków i tabel na końcu.

2. CEL BADAŃ (W ODNIESIENIU DO TEZY ROZPRAWY). Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora?

Wprawdzie Doktorant formułuje we wstępnym rozdziale pracy tezę, która brzmi w języku angielskim jak następuje: "The proposed optimization framework provides an efficient modeling means for optimizing critical function placement to ensure resilient networks services". Niestety, jest to całość podrozdziału 1.3, który został poświęcony wprowadzeniu tezy, która poza tym w ogóle nie jest dyskutowana (np. Doktorant nie odnosi się do niej potem bezpośrednio w podsumowaniach poszczególnych rozdziałów 2-4). Być może w takim razie byłoby zasadne w ogóle jej nie wprowadzać, tym bardziej że w zasadzie nie jest potrzebna, a koncepcja doktoratu opiera się na połączeniu trzech studiów, które są przynajmniej częściowo niezależne (skąd zapewne końcowe "selected problems" w tytule rozprawy). W ostatnich latach tego rodzaju podejście do doktoratu w dyscyplinie Informatyka

Akademia Górniczo–Hutnicza | Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Instytut Telekomunikacji
al. A. Mickiewicza 30, 30–059 Kraków,
tel. +48 12 617 39 37, fax +48 12 634 23 72
e–mail: kt@agh.edu.pl, www.agh.edu.pl

Techniczna i Telekomunikacja (ITiT) upowszechniło się (jako pewna forma niekonsekwentnego zaprezentowania rozprawy tak naprawdę opartej na cyklu publikacyjnym) i jest zresztą powszechnie akceptowane. Uważam, że złożenie rozprawy z trzech częściowo powiązanych studiów jest dobrą formą prezentacji wyników i w tym sensie nie ma potrzeby formułować tezy.

Mimo że w odniesieniu do tezy w tym przypadku nie byłoby potrzeby więcej powiedzieć, to jednak Doktorant zarysowuje już w rozdziale wstępnym dosyć obszernie i atrakcyjnie dla odbiorcy zakres tematyczny, którym zamierza się zająć, a który jest faktycznie zgodny z podaną tezą oraz tytułem doktoratu. Tutaj w zakresie omówienia celu badań; skupię się zatem w opisie przedmiotu i koncepcji pracy na wybranych elementach tezy i tytułu:

- "Optimizing" / „optimization framework": zaprezentowane w rozprawie trzy duże studia wychodzą od pewnej konkretnej potrzeby aplikacyjnej, przedstawiają pewien abstrakcyjny scenariusz realizacyjny i matematyzują zagadnienie, finalnie przedstawiając pewne zadanie (lub zadania) optymalizacji, na podstawie rozwiązania których można zaplanować określone działanie sieci teleinformatycznej.
- "Efficient modeling means": akurat to pojęcie nie jest wyraźnie doprecyzowane w rozdziale wstępnym i w tym przypadku należy żałować, że teza nie została omówiona przez Autora, gdyż pojęcie efektywności można rozumieć na wiele sposobów; oczywiście z punktu widzenia intuicyjnego i potem przedstawionych badań jest jasne, że chodzi o skalowalny sposób rozwiązywanie opracowanych zadań optymalizacji, które – gdyby miały charakter zwarty (tj. uwzględniający wszystkie możliwe przypadki) – byłyby ogromne i niekoniecznie wyrażalne (a kłopotliwe nawet do samego sformułowania) lub są po prostu zdefiniowane z użyciem sposobu modelowania, które do rozwiązania wymagają po algorytmów, wykazujących nieatrakcyjną złożoność obliczeniową (bo np. należą do klasy NP-trudnych); Autor pracy konstruuje sposoby poszukiwania rozwiązania zadań, które rokują, że będą prowadziły co najmniej do szybkiego rozwiązania suboptymalnego – udaje się to we wszystkich przypadkach, o czym można wnosić z przedstawionych przykładów liczbowych.
- "Critical function placement": każde z przedstawionych studiów skupia się na pewnym zagadnieniu inżynierskim, które jest przedstawione w kontekście zapewnienia rozmieszczenia w topologii sieciowej co najmniej jednej wybranej funkcjonalności rozpatrywanej w kontekście zabezpieczania poprawnego działania sieci teleinformatycznej.
- "To ensure resilient networks services": wspomniane wyżej rozmieszczenie dotyczy trzech różnych istotnych problemów zarządczych, tj. (1) odpornego na ataki umiejscowienia sterowników w sieci sterowanej programowo (SDN, j. ang. *software defined network*) lub (2) rozlokowania tzw. sensorów zabezpieczających przez atakami polegającymi na masowym zalewaniu „ofiary" ruchem teleinformatycznym (DDoS, j. ang. *distributed denial of service*), ewentualnie (3) rozmieszczenia uporządkowanych w kolejności wykonywania zadań wirtualnych funkcji sieciowych (VNF, j. ang. *virtual network functions*) w infrastrukturze, w której istnieje tego rodzaju swoboda, przy czym Doktorant zakłada, że te funkcje służą do realizacji pewnych usług związanych z bezpieczeństwem (np. wykrywanie ataków).

Wszystkie przedstawione problemy są ważne i nieproste. Zostały w sposób jasny zarysowane w poszczególnych rozdziałach 2-4, jak również przede wszystkim opracowane od strony matematycznej. Nie mam wątpliwości, że Doktorant wypracował bardzo wartościowe wyniki, chociaż niekoniecznie opisał w rozprawie sam fakt dowodzenia tezy (ale przynajmniej w krótkich konkluzjach podanych w rozdziałach 2 i 4 widać pewne odniesienia do punktów węzłowych tezy).

3. **SPOSÓB PRZEPROWADZENIA ANALIZY ŹRÓDEŁ. SPOSÓB SFORMUŁOWANIA WNIOSKÓW WYNIKAJĄCYCH Z ANALIZY ŹRÓDEŁ. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadczący o dostatecznej wiedzy Autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonywujący?**

Lista pozycji bibliograficznych liczy 132 prace anglojęzyczne, w przeważającej większości aktualne (lub stanowiące prace klasyczne dla problematyki, nawet jeśli starsze) i dobrze reprezentujące obszar badań. Nacisk jest położony przede wszystkim na dwa rodzaje prac: (1) wprowadzające zagadnienie praktyczne, co stanowi dla Doktoranta punkt wyjścia do badań związanych z modelowaniem i opracowaniem algorytmów obliczeniowych; (2) teksty skupione właśnie na tym aspekcie matematyzacji oraz rozwiązywania określonych problemów. Zamieszczone pozycje dowodzą rozeznania w tematyce, którą zajmuje się Autor rozprawy. Nie mam wątpliwości, że dobrze zna tematykę, której się poświęcił.

Po stronie wad opiniowanego tutaj aspektu rozprawy wskazałbym, że raczej byłoby zasadne przedstawienie odrębnego rozdziału, który z jednej strony opisuje w sposób szerszy wiedzę zastaną związaną i z kontekstem praktycznym i nawet kontekstem modelowania, gdyż np. niektóre pojęcia używane w różnych rozdziałach nie od razu muszą być czytelne (np. określone typy gier, wybrane zagadnienia związane ze złożonością obliczeniową). Ponadto przedstawienie takiego wyróżnionego bloku tekstu dawałoby szansę na uspójnienie używanych pojęć i konwencji notacyjnych, jak również na bardziej wyraźne wskazanie, co praca wnosi w stosunku do tła literaturowego. Odpowiednie komentarze są wprawdzie w pracy obecne, ale bardzo rozproszone, co nieco utrudnia odbiór przez czytelnika. Znajduję je w rozdz. 1, ale także w podrozdziałach wstępnych do rozdz. 2-4 przedstawiających poszczególne studia, tj. 2.1, 3.1 i 4.1, przy czym wydaje mi się, że np. w rozdz. 2 więcej miejsca poświęcono naciskowi na oryginalność prac własnych niż np. w rozdz. 1 (nie chcę powiedzieć, że któreś z tych prac są mniej oryginalne, tylko że Doktorant niekonsekwentnie starał się to równomiernie uwypuklić). W tym sensie opis analityczny źródeł mógłby być bardziej przekonujący.

4. **ROZWIĄZANIE PRZEDSTAWIONEGO ZADANIA, WŁAŚCIWOŚCI PRZYJĘTYCH METOD I ZAŁOŻEŃ. Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?**

Rozprawa ma w zasadzie charakter teoretyczny, chociaż dotyczy potencjalnych aplikacji praktycznych. W dużym stopniu przedstawione prace obejmują zagadnienia wykorzystania metod matematycznych (głównie optymalizacja, nieco teorii gier

oraz statystyka i teoria grafów w sferze opisów) w odniesieniu do projektowania odpornych na uszkodzenia (głównie intencjonalne) sieci teleinformatycznych. W gruncie rzeczy to właśnie podejście metodologiczne jest (obok ogólnego nastawienia na zagadnienia związane z bezpieczeństwem) czynnikiem łączącym trzy przedstawione studia.

Rozdział 2 jest poświęcony zagadnieniu pn. "Robust Controller Placement", które skupia się na takim rozlokowaniu sterowników sieci SDN, żeby zapewnić dostęp do nich przełączników nawet po wystąpieniu ataku i to ataku celowanego w taki sposób, żeby zmaksymalizować negatywny wpływ na sieć (tj. np. z intencją jak największego izolowania przełączników). Aspekt matematyzacji obejmuje: po pierwsze, sformułowanie gry opisującej wyimaginowaną interakcję między atakującym a operatorem zabezpieczającym sieć przez inteligentne rozmieszczenie sterowników; przy czym ze względu na probabilistycznych charakter zysków obu graczy poszukuje się rozwiązania najkorzystniejszego z użyciem dwóch dualnych zadań optymalizacji (po jednym dla każdej ze stron). W związku z tym, że sformułowanie zadań obejmujących w realistycznych przypadkach wszystkie możliwości jest co najmniej niezwykle wyczerpujące, po drugie, Doktorant opracował iteracyjne podejście oparte na generacji kolumn (skądinąd z nietrywialnymi zadaniami dyskretnymi służącymi do wytworzenia nowych konfiguracji), które upraszcza formułowanie i rozwiązywanie problemu. Następnie Autor pokazuje na wybranych przykładach, że proponowana metoda istotnie przynosi oczekiwane skutki (analizowane są adekwatne wielkości mierzalne: w tym przypadku zysk każdego z graczy czy liczba strategii sprzyjających, liczba niezbędnych iteracji algorytmu; ponadto – jak zresztą w każdym ze studiów – oczywiście czasu obliczeń). Moim zdaniem z punktu widzenia bogactwa pomysłów jest to najciekawsze i najgłębsze studium w całej rozprawie. Z uznaniem patrzę również na dokładne wytłumaczenie zagadnień użycia konkretnej gry, z użyciem której Autor modeluje zagadnienie; także z użyciem bardzo czytelnych przykładów prostych topologii sieciowych. Na szczęście późniejsze przykłady obliczeniowe już nie zawierają tak regularnych struktur, co oczywiście czyni studium bardziej realistycznym.

Rozdział 3 dotyczy problematyki tzw. "Traffic Sentinel Placement", w ramach której celem jest zapobieganie atakom DDoS, które mogą przebiegać na wskazane urządzenia, a które mogą być generowane z dowolnego innego urządzenia sieciowego. Pomysł zaprezentowany w rozprawie dotyczy umieszczenia w wybranych węzłach topologii sieciowej urządzeń, które można nazwać sensorami, co do których zakłada się, że co najmniej wykryją, a może nawet powstrzymają atak w pewnych fragmentach sieci (np. blokując ruch od atakującego do ofiary, gdyż występują na domyślnej ścieżce). W tym przypadku matematyzacja zagadnienia obejmuje opracowanie odpowiedniego zadania optymalizacji odnoszącego się do pewnych wariantów problemu poszukiwania przepływu maksymalnego. Mówiąc dokładniej, Autor opiera się na wyniku związanym z zadaniem dualnym, tj. dotyczącym minimalnego rozcięcia, przy czym zastosowana wersja z dodatkowymi warunkami nie jest już całkowicie unimodularna, w odróżnieniu do wersji najprostszej (co stanowi już wyzwanie w przypadku rozwiązywania). Zadanie występuje w dwóch wariantach, uwzględniających praktyczne zagadnienia stojące przed projektantami: minimalizację liczby dodawanych sensorów przy założonym poziomie szkodliwego ruchu związanego z atakiem i podejście odwrotne – polegające na minimalizacji takiego ruchu przy założonej liczbie dodawanych sensorów. Rozdział, co znamienne, zawiera też

przeprowadzenie dowodu, że złożoność problemu jest zaporowa w przypadku przeskalowywania wielkości: Doktorant opracował odpowiednie redukcje ze znanego problemu NP-zupełnego. W związku z tym, zaproponowano heurystyczny sposób rozwiązywania zadań optymalizacji. Warto zwrócić uwagę, że sposób ten wychodzi od głębokich intuicji optymalizacyjnych, opartych na relaksacji problemu (unikając niestety nadużywanego w literaturze podejścia opartego na nieco ślepym poszukiwaniu prostych heurystyk stochastycznych czy tp.). Wprowadzone relaksacje są iteracyjnie poprawiane, by dać rozwiązanie dopuszczalne problemu wyjściowego. Tak jak i poprzednio Doktorant ilustruje potencjał zaproponowanego podejścia (tym razem z wielkości charakterystycznych dla zagadnienia, wybrał również adekwatnie: wielkość ruchu potencjalnie związanego z atakiem lub wielkość zbioru dodawanych sensorów).

Rozdział 4 obejmuje badania na temat "Multi-Domain Service Function Chain Placement", tj. sposobów organizacji transmisji, która będzie korzystała z pewnych funkcji wirtualnych osadzonych w węzłach sieciowych (nawet należących do różnych organizacji, również przy założeniu wirtualizacji sieci z użyciem fragmentacji w oparciu o podejście tzw. w j. ang. *slicing*. Transmisja ta wymaga ze względu na sposób realizacji całego szeregu funkcji określonej kolejności. Podobnie jak we wcześniejszym rozdziale, Doktorant formułuje zadanie optymalizacji, które ze względu na zaangażowanie zmiennych dyskretnych jest trudne do rozwiązania, w związku z czym opracowano heurystykę opartą na iteracyjnym rozwiązywaniu uproszczonej wersji zadania. W tym przypadku rozważane jest podejście polioptymalizacyjne, gdyż z punktu widzenia praktycznego zastosowano ważoną funkcję celu łączącą dwa kryteria: maksymalizacji możliwości obciążenia sieci w przyszłości oraz minimalizacji liczby zaangażowanych wirtualnych elementów składowych sieci (tzw. *slices*). Również tutaj przedstawiono przykłady liczbowe związane z zastosowaniem opracowanego podejście (wybrano adekwatne wielkości opisujące wyniki, w tym poziom użycia zasobów czy liczbę zaangażowanych elementów strukturalnych). Doktorant poszerza to studium również o podejście związane z zadaniem optymalizującym użyteczność sieci, chociaż w tym przypadku nie do końca jest dla mnie czytelne, jakie jest powiązanie tych końcowych wyników z problematyką ułożenia łańcucha funkcji sieciowych (bez wątpienia jest to kwestia, której rozjaśnienia oczekiwałbym w ramach obrony). Innym dodatkiem do tego studium jest również opis emulacji działania infrastruktury, w której ustanawia się łańcuchy funkcji wirtualnych. Jest to ilustracja, w jaki sposób rozwiązanie może działać w praktyce. Stanowi ona pewną ciekawostkę uzupełniającą zasadnicze podejście badawcze prezentowane w tym doktoracie, tym bardziej że tego typu zagadnienie nie zostało opracowane w odniesieniu do dwóch pozostałych studiów.

Moim zdaniem wszystkie trzy rozdziały wnoszą istotny wkład do dziedziny:

- Operują w istotnym obszarze wkładu w odniesieniu do przede wszystkim płaszczyzny zarządzania, przy czym nacisk jest położony na projektowanie sieci zabezpieczanych przed uszkodzeniami (głównie intencjonalnymi, tj. będącymi skutkami ataków, chociaż wyniki są w zasadzie bezpośrednio rozszerzalne oczywiście na prostszy kontekst uszkodzeń nieintencjonalnych).
- Odnoszą się do zasadnych z punktu widzenia operacyjnego scenariuszy, które nawet gdyby nie były pierwszym i najistotniejszym scenariuszem obrony przed wskazanymi zagrożeniami, to stanowią jedną z niezaniedbywalnych i aktualnych metod przeciwdziałania problemom z zakresu bezpieczeństwa. Na pewno służy to pogłębieniu i poszerzeniu

wachlarza metod, którym dysponuje projektant systemu teleinformatycznego.

- Wreszcie na koniec o tym, co wydaje mi się najbardziej wartościowe: przedstawione prace używają poprawnej metodologii, prezentując niebanalne i głęboko osadzone w teorii metody matematyzacji wskazanych zagadnień (w rozdz. 2 nawet z dowodami nt. złożoności obliczeniowej), których wyniki można w praktyce wbudować w odpowiednie oprogramowanie obsługujące działanie płaszczyzny zarządzania (a być może w szczególności w odniesieniu do tworzenia łańcucha funkcji sieciowych także we wsparcie płaszczyzny sterowania). Z punktu widzenia abstrakcyjnego modelowania wszystkie trzy studia opierają się na różnych problemach optymalizacyjnych, co istotnie podnosi bogactwo wyników.

Z punktu widzenia metodologicznego nie mam zastrzeżeń związanych z samym modelowaniem (czyli matematyzacją) przedstawionym w każdym ze studiów. Również opracowane algorytmy efektywnego rozwiązywania poszczególnych trudnych zadań optymalizacji są bardzo obiecujące i wskazują na bardzo dobre rozeznanie w zakresie stosowanych podejść „ataku" na trudne zagadnienia. Z tego punktu widzenia doktorat zasługuje na duże uznanie, gdyż stanowią one dowód dużej wiedzy i pomysłowości Autora.

Jeśli chodzi o praktyczne wykazanie stosowalności wyników, to pozwolę sobie podnieść dwa poniższe zastrzeżenia, które na pewno są warte szerszej dyskusji.

Pierwsza kwestia dotyczy tego, na ile opracowane podejścia realistycznie rozwiązują faktycznie kwestie zwiększania poziomu bezpieczeństwa projektowanych sieci. Tutaj trzeba powiedzieć, że prace prezentują raczej nurt nastawiony bardziej na zagadnienie matematyzacji pewnego problemu bez bliskiego odniesienia do rzeczywistości, np. praktycznego badania czy w ogóle przedstawiony sposób radzenia sobie z konkretnym zagadnieniem jest finalnie skuteczny w praktyce operacyjnej sieci. W tym przypadku ilustracyjna emulacja podana w rozdz. 3 stanowi pewien podstawowy krok w odpowiednią stronę. Doktorant nie bardzo skupia się jednak na tym problemie, co najwyżej w świetle literatury uzasadniając, że przyjęte podejście bywa stosowane przez autorów poważanych publikacji. I na tym kończę moje zastrzeżenie, zakładając że faktycznie mamy tutaj do czynienia z określonym paradygmatem prowadzenia badań w obszarze informatyki nastawionych głównie na matematyzację pewnego zagadnienia i opracowanie go od strony algorytmów rozwiązywania.

Moje drugie zastrzeżenie ma, przynajmniej w moich oczach, nieco istotniejszy ciężar od strony metodologicznej. Otóż przedstawione przez Doktoranta metody są ilustrowane w każdym przypadku pewnymi przykładami obliczeniowymi, które pokazują przynajmniej w odniesieniu do użytych sieci wartość prezentowanego podejścia. Tutaj Doktorant chętnie używa popularnych topologii, które faktycznie stanowią przedmiot badań w zakresie projektowania sieci teleinformatycznych. Zastanawiam się jednak, czy nie dałoby się podjąć poważniejszej próby generalizacji wyników z użyciem tego rodzaju metody, jak również podniesienia ich wiarygodności statystycznej, tj. nieco bardziej potraktować tutaj obliczenia jako pewnego rodzaju eksperymenty. Np. można byłoby w pełni zautomatyzować algorytmy proponowane do użycia w rozprawie i przeprowadzić analogiczne badania na dużej liczbie losowo generowanych topologii (oczywiście zachowujących określony charakter choćby struktury sąsiedztwa, dajmy na to w oparciu o model Barabasiego-Albert itd.). Przy tym wyniki np. związane z efektywnością heurystyki albo czasem obliczeń czy liczbą iteracji można byłoby odnosić do jakiejś ogólnej

zmiennej opisującej wielkość topologii (np. rząd czy rozmiar grafu). Wtedy dałoby się wiarygodnie estymować średnie, dla których można byłoby oszacować odchylenie standardowe itp. Bynajmniej nie chcę negować np. faktu że metody dobrze działają na konkretnej sieci cost czy tp., ale zapewne poziom przekonania środowiska naukowego, że metoda sprawdza się na wielu tysiącach topologii, byłby po prostu wyższy. Skądinąd z punktu widzenia zadbania o wiarygodność statystyczną rozdz. 2 idzie najdalej, gdyż Doktorant założył pewną losową wariantowość (raczej parametrów konkretnej sieci niż ulosowienie topologii, ale jest to stanowi ruch w dobrą stronę). Faktem jest, że w badaniach w zakresie optymalizacji sieci raczej nie prowadzi się tego typu szerokich obliczeń służących uwiarygodnieniu podejścia, ale myślę, że ze względów metodologicznych byłoby to zasadne.

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

Praca jest napisana eleganckim i dobrze zrozumiałym językiem. Dotyczy to zarówno bardzo czytelnej konceptualizacji (jasny sposób wprowadzania pomysłów, notacji oraz opracowanych wyników, jak również syntetyczne ich ujęcie podsumowujące z przedstawieniem ciekawych pomysłów na dalszy ciąg prac), ale też po prostu użycia języka angielskiego, z używający poprawnej terminologii. Raczej nie rzuciły mi się w oczy odstępstwa od standardu gramatycznego.

Nie ulega dla mnie wątpliwości duża dojrzałość Autora rozprawy w zakresie przedstawiania rzetelnych wyników badań własnych. Z drugiej strony w niektórych przypadkach brakowało mi trochę głębszej analizy oraz interpretacji wyników – Doktorant niekiedy przywoływał rysunki i tabele z wynikami, ale nie wchodził zbyt głęboko w opis, co dokładnie można z nich wyczytać, a to na pewno ułatwiłoby czytelnikowi odbiór pracy. Niestety, rzadko przecież się zdarza, żeby – szczególnie w przypadku tabel – przedstawiane liczby były samozrozumiałe (dotyczy to też prezentacji niektórych algorytmów, np. nr 4 na str. 80-81, gdzie opisowi poświęcono tylko 4 linijki!), co przerzuca na czytelnika ciężar własnej analizy oraz interpretacji.

Ze względu na fakt, że doktorat łączy trzy w zasadzie dosyć luźno powiązane studia, które zapewne są wynikiem kilkuletnich badań prowadzonych w różnych kontekstach, na różne sposoby itd. w oczy rzucają się pewne niekonsekwencje w zakresie co najmniej notacyjnym, np. grafy opisujące odpowiednie topologie są odmiennie opisywane w rozdz. 2 czy 3. Nie jest to duży problem, ale zapewne warto byłoby takie sprawy uspójniać. Również rozkład akcentów np. w przypadku opisu literaturowego nie zawsze jest zrównoważony i być może wynikał z zastosowania fragmentów publikacji, które wcześniej opracowano (np. wydaje mi się, że w rozdz. 3.1 większy nacisk niż w przypadku 2.1 czy 4.1 położono na podkreślenie wniesionego oryginalnego wkładu na tle literatury przedmiotu, a uważam, że we wszystkich przypadkach ten wkład był porównywalnie duży). W przykładach liczbowych użyto różnego nieco odmiennej infrastruktury obliczeniowej i oprogramowania (np. różnych wersji CPLEX). Podobna kwestia dotyczy zastosowanych topologii, które też różnią się między rozdziałami.

Koncepcja rozprawy od strony prezentacyjnej oraz redakcja stoją na wysokim poziomie. Niewielkie błędy, które dostrzegłem charakteryzują poniżej.

- Kwestie językowe:
  - W ogólności praca jest napisana bardzo dobrym językiem bez żargonu, z wprowadzeniem odpowiednich skrótów, pojęć itp. Akurat w przypadku polskiego streszczenia Autor może nieco nieszczęśliwie spolszczył słowo „routing" pozostawiając je w zapisie oryginalnym, ale z odmianą polską. Nie mam jednak poza tym zastrzeżeń.
  - Zdarza się nieco nieszczęśliwie użycie skrótów typu "doesn't" (str. 8), co w przypadku języka bardziej formalnego, charakterystycznego dla rozprawy doktorskiej, powinno być unikane.
  - Na str. 56 wystąpiło słowo wprawdzie obecne w j. ang. "studded", ale podejrzewam, że to literówka i miało być "studied".
- Zagadnienia strukturalne:
  - Brak wydzielenia rozdziału z analizą literaturową oraz opisem wiedzy zastanej.
  - Sekcja 3.1.1 jest napisana w sposób dla mnie nie w pełni logiczny: kwestię różnych ataków typu DoS opisano w końcowym akapicie; uważam jednak, że najpierw warto byłoby przedstawić sposoby atakowania, potem potencjalnej reakcji na nie, a dopiero potem opisać np. odpowiednie modele matematyczne służące do poradzenia sobie z pewnym zagadnieniem. O niekonsekwencjach świadczy też w moich oczach, że fraza „Armbruster et al. [9] analyze the problem of packet filter placement to defend a network against spoofed denial of service attacks" obecna na str. 52 wystąpiła na początku tej sekcji na str. 48.
  - Wprowadzenie sekcji 2.4.1, podczas gdy nie ma już sekcji następnej 2.4.2. Podobnie w przypadku 3.3.1, 4.2.1, 4.3.1, czy 4.4.1.
- Niekonsekwencje oznaczeń:
  - W przypadku tytułów rozdziałów konsekwentnie wszystkie słowa są pisane wielką literą, ale tej konsekwencji nie zachowano już w przypadku tytułów podrozdziałów czy sekcji składowych (np. znajduję "4.1.2 Our proposal", ale jednocześnie "4.4.1 The Greedy Heuristic").
  - Zwyczajowo tytuły tabel zamieszcza się nad nimi (co skądinąd ma miejsce w przypadku tab. 2.1), ale Doktorant nie jest tutaj spójny i chyba nawet przeważa sposób zastosowany w przypadku tab. 2.2. Ponadto różne tabele używają odmiennych wielkości czcionek; czasem też w języku angielskim używa się przecinka dziesiętnego charakterystycznego dla języka polskiego.
  - Na str. ix niekiedy wprowadza się angielskie odpowiedniki poprzedzone słowem „ang.", ale nie zawsze (czasem „j. ang.").
- Elementy opisu literaturowego:
  - W bibliografii sposób zapisu tytułów tekstów jest niekonsekwentny, niekiedy stosowane są wielkie litery w tytułach (np. w przypadku [1]), a w niektórych już tylko pierwsze słowo jest

pisane wielką literą (np. [2]). Podobna niekonsekwencja dotyczy sposobu zapisu tytułów periodyków, np. w przypadku poz. [1] użyto skróconego tytułu *IEEE Trans. Mob. Comput.*, podczas gdy np. w przypadku poz. [9] użyto pełnej wersji tytułu *European Journal of Operational Research*.

- W przypadku ostatniego autora pozycji [10] zamiast „M. L. P. Jr." powinna zostać podana pełna wersja nazwiska, tj. „M. L. Proença, Jr.".
- W opisie pozycji [30] znajduję zaskakujący fragment „Bibliografija: str. 335-338 Kazali".
- Nazwisko trzeciego współautora poz. [63] zostało omyłkowo zapisane bez polskich znaków diakrytycznych.

W ogólności jednak staranność przedstawiania wyników jest wysoka.

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

Wcześniej już szerzej przedstawiłem (raczej umiarkowaną krytykę) kilku aspektów rozprawy, więc tutaj jedynie punktowo i podsumowująco:

- Podejście do literatury i wiedzy zastanej nie zostało przedstawione w sposób systematyczny i konsekwentny.
- Praca składa się z trzech względnie niezależnych studiów. Samo w sobie nie jest to problematyczne, ale w trakcie składania tekstu rozprawy warto byłoby dopilnować uspójnienia np. notacji, a także warto byłoby w sposób bardziej konsekwentny podejść do kwestii wprowadzenia tezy oraz położenia nacisku na jej wykazanie.

Powyższe dwie kwestie dotyczą raczej sposobu napisania rozprawy i nie mają istotnego charakteru merytorycznego. Z tego ostatniego punktu widzenia największą słabość pracy upatruję w następującym problemie:

- Przedstawione wyniki o charakterze liczbowym na pewno zyskałyby bardziej na ogólności, gdyby uzyskano je z użyciem większej liczby sieci, które byłyby generowane w sposób losowy. Można byłoby w takim przypadku bardziej wiarygodnie oszacować np. stopień efektywności działania wprowadzonych metod ułatwiających obliczenia.

Chcę jednak podkreślić, że nawet to ostatnie zastrzeżenie ma raczej charakter postulatywny i nie traktuję go jako wskazującego na istotne uchybienie. Nie wątpię, że same przedstawione przez Doktoranta modele oraz opracowane algorytmy rozwiązywania zadań są poprawne i wartościowe.

7. PRZYDATNOŚĆ ROZPRAWY DLA NAUK TECHNICZNYCH, PRZEMYSŁU, OBRONNOŚCI KRAJU ITP.

Rozprawa jako mająca charakter w dużym stopniu związany z przedstawieniem badań w zakresie modelowania i algorytmiki obliczeniowej wnosi już z tego względu wkład w samą dyscyplinę informatyki technicznej i telekomunikacji. Ze uwagi na fakt, że przedstawione studia są nastawione na matematyzację zagadnień praktycznych związanych z jednej strony z zabezpieczaniem sieci (przede wszystkim

problematyka odpornego na ataki umiejscowienia sterowników SDN, jak również kwestia umiejscowienia sensorów chroniących przed atakami DoS) prace Doktoranta mają potencjał aplikacji w obronności. Uniwersalne nastawienie na projektowanie sieci (czego dotyczą dwa pierwsze studia i oczywiście trzecie, które jest przedstawione w kontekście aplikacji bezpieczeństwa, ale przecież na poziomie abstrakcyjnym może dotyczyć rozmieszczenia dowolnych funkcji) powoduje, że wyniki są interesujące także dla przemysłu (głównie różnego typu operatorów lub planistów centrów danych itd.).

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

Rozprawa spełnia wymagania ustawowe: Doktorant dowiódł znajomości istotnych aspektów związanych z badaniami w ramach dyscypliny, przy czym w oczywisty sposób jego prace obejmują ważną problematykę w ramach telekomunikacji (działalność w ramach przygotowania procedur charakterystycznych głównie dla płaszczyzny zarządzania), jak również w ramach informatyki technicznej (matematyzacja zagadnień inżynierskich oraz ich efektywne rozwiązywanie z punktu widzenia złożoności obliczeniowej).

Przedstawione wyniki są oryginalne i na pewno interesujące dla badaczy zajmujących się zbliżoną tematyką. Znajduje to również potwierdzenie w fakcie opublikowania co najmniej części prezentowanych w rozprawie wyników w pokaźnej serii prac naukowych współautorstwa Autora. Cała rozprawa jest dobrym przykładem raportowania wyników, które zawierają istotny komponent matematyczny, bez czego nie wyobrażam sobie poważnej pracy naukowej w dyscyplinie ITiT, a co niestety coraz rzadziej ma miejsce. Uważam to za ogromną zaletę tego doktoratu. Co więcej, wkład tego rodzaju uważam za istotnie większy niż typowo prezentowany.

Tym samym stwierdzam, że Doktorant wykazał umiejętności prowadzenia prac badawczych. Wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

9. OCENA ROZPRAWY. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę (niepotrzebne skreślić)?

~~a. Nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy~~
~~b. Wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania.~~
~~c. Spełniająca wymagania.~~
d. Spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem.
~~e. Wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie.~~

Piotr Chołda