



15.02.2025 r.

Dr hab. inż. Jacek Rak, prof. PG
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Politechnika Gdańska

Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł: AI-assisted Dimensioning Methods for Network Slicing
in Next Generation Mobile Networks

Autor: Mgr inż. Dominik Dulas

Promotor: Prof. dr hab. inż. Krzysztof Walkowiak

1. Informacje ogólne

Rozprawa doktorska mgra inż. Dominika Dulasa dotyczy problemów prognozowania ruchu i wymiarowania zasobów w sieciach 5G. Szczególna uwaga jest poświęcona w pracy mechanizmowi *network slicing* będącego formą wirtualizacji zasobów systemu 5G, umożliwiającemu przydział zasobów systemu odseparowanym strukturom utworzonym w celu świadczenia określonych usług. Poruszany w rozprawie problem wymiarowania zasobów sieci 5G z uwzględnieniem prognoz dotyczących natężenia ruchu należy niewątpliwie uznać za istotny oraz aktualny, m.in. z uwagi na wyraźnie zwiększone (nawet stukrotnie zdaniem Nokii) w porównaniu z systemami poprzedniej generacji (4G) wymagania jakościowe związane ze świadczeniem usług 5G, m.in. w kontekście opóźnienia transmisji, przepływności, jak i liczby obsługiwanych urządzeń zewnętrznych. Słusznie podkreśla Autor, że kluczowa w tym kontekście jest właściwa interpretacja (najlepiej w czasie rzeczywistym) dynamiki zmian wymagań ze strony użytkowników oraz związana z nią potrzeba opracowania zaawansowanych mechanizmów przewidywania zmian natężenia ruchu w systemie, aby być w stanie adekwatnie dostosować wielkość przydzielonych zasobów.

Rozprawa doktorska mgra inż. Dominika Dulasa została napisana w języku angielskim. Obejmuje ona dziesięć numerowanych rozdziałów oraz cztery części nienumerowane, w tym bibliografię zawierającą 112 adekwatnie wybranych pozycji literatury.

JRak

WPLYNEŁO

19-03-2025

RDN 003/97/2025

Oceniana rozprawa opisuje wyniki realizacji doktoratu wdrożeniowego w ramach współpracy Doktoranta z firmą Nokia. Celem wdrożeniowym opracowanych przez Doktoranta rozwiązań jest ich praktyczne zastosowanie w firmie Nokia w celu wspomoczenia procesów autokonfiguracji systemu 5G dzięki rozwiązaniu umożliwiającemu automatyczne rekomendacje w zakresie wymiarowania zasobów.

Prowadząc prace w kierunku przygotowania rozprawy doktorskiej, Doktorant opublikował część rezultatów swoich prac badawczych w czterech artykułach, w tym w jednym artykule konferencyjnym (konferencja SoftCOM 2022; 20 pkt MNiSW), w dwóch artykułach w czasopiśmie Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne (rok 2023 i 2024; 20 pkt MNiSW) oraz w jednym artykule w czasopiśmie IEEE Access (rok 2024; 100 pkt MNiSW). Doktorant jest pierwszym autorem wszystkich wymienionych czterech prac.

1. Jaki jest cel naukowy rozprawy i czy został on trafnie i jasno sformułowany?

Celem naukowym rozprawy jest opracowanie mechanizmów wymiarowania zasobów dla sieci 5G ze szczególnym uwzględnieniem kwestii prognozowania zmiennego w czasie natężenia ruchu. Cel jest ten sformułowany w sposób jasny na początku rozprawy. Problem rozpatrywany przez Doktoranta jest także aktualny i o dużym znaczeniu praktycznym, co podkreśla m.in. zapotrzebowanie na rozwiązania tej klasy ze strony firmy Nokia, dla której Doktorant opracował rozwiązania będące przedmiotem oceny niniejszej rozprawy.

W szczególności, cel naukowy rozprawy jest w sposób właściwy umotywowany czterema problemami badawczymi zawartymi na stronie 20 rozprawy oraz poprawnie sformułowaną tezą stanowiącą o *możliwości opracowania metody o właściwościach przewyższających najlepsze znane obecnie procedury wymiarowania sieci 5G przy wykorzystaniu modelowania opartego na danych prognozowanej wartości przepustowości i opóźnień transmisji*.

Jako właściwy oraz adekwatny pod względem stopnia trudności dla prac badawczych na poziomie doktorskim uznaję również zakres prac zrealizowanych i opisanych w niniejszej rozprawie.

2. Na czym polega oryginalny dorobek Autora i jakie jest znaczenie poznawcze lub przydatność praktyczna dla nauki bądź techniki?

W skład dorobku Autora, oprócz osiągnięć udokumentowanych w czterech artykułach naukowych, wchodzi zawartość ocenianej rozprawy doktorskiej obejmująca:

- analizę stanu sztuki w szczególności w kontekście technik prognozowania ruchu dla sieci 5G, wymiarowania sieci oraz roli tzw. cyfrowego bliźniaka (ang. digital twin) zawartą w rozdziale 2,
- opis właściwości danych rzeczywistych wykorzystanych do badań przedstawiony w rozdziale 3,

- analizę właściwości rozwiązań dostępnych w literaturze w kontekście prognozowania ruchu i wymiarowania sieci 5G z uwzględnieniem aspektów QoS zawartą w rozdziałach 4 i 5 rozprawy,
- porównanie charakterystyk prognozowania krótko- i długoterminowego ukazane w rozdziałach 6-7 rozprawy,
- szczegółowy opis właściwości opracowanego całościowego schematu wymiarowania zasobów sieci 5G (rozdziały 8 i 9 rozprawy),
- analizę możliwości dalszych rozszerzeń opracowanego rozwiązania w kontekście otwartych problemów naświetlonych w rozdziale 10 rozprawy.

W szczególności, za najważniejsze moim zdaniem osiągnięcia Doktoranta o istotnym znaczeniu praktycznym należy uznać:

- zaprezentowaną w rozdziale 8 propozycję metody oszacowania na poziomie systemu statystycznego zysku multipleksowania agregowanych łączy transportowych sieci 5G, która charakteryzuje się dużą skalowalnością, co w przypadku analizowanych scenariuszy pozwoliło na wyraźne ograniczenie czasu obliczeń z poziomu dni do poziomu sekund,
- opisany całościowo w rozdziale 9 schemat oparty o analizę danych prognozowania i wymiarowania zasobów sieci 5G integrujący koncepcję cyfrowego bliźniaka, który, zaimplementowany jako autonomiczne narzędzie może być wysoce użyteczny nie tylko jako narzędzie zarządzające w sposób autonomiczny przydziałem zasobów (czy też jako narzędzie „doradcze” sugerujące modyfikację przydzielonych zasobów sieci), ale również jako wartościowe narzędzie symulacyjne służące do oceny charakterystyk potencjalnych stanów systemu wymagających dodatkowej uwagi.

Ocena składowych rozwiązania opracowanego przez Doktoranta skłania mnie do uznania, że problem rozpatrywany w niniejszej rozprawie został rozwiązany, a teza rozprawy wykazana.

3. Jakie są słabsze strony rozprawy?

Uwagi natury ogólnej

- a) Rozdział 1 koncentruje się na ukazaniu możliwości (dla operatora i użytkownika), jakie oferują sieci 5G (w kontekście atrybutów QoS jak i sposobów oferowania usług bazując na mechanizmie network slicing), jednakże nie ukazując przyczyn technicznego uzasadnienia tego postępu. Np. na stronie 12 rozprawy zawarta jest informacją o redukcji wartości opóźnienia transmisji w systemach 5G do poziomu 1 ms wobec 100 ms we wcześniejszych systemach 4G bez uzasadnienia skąd bierze się ta poprawa (podobnie w odniesieniu do przepływności 10 Gbps wobec wcześniejszej wartości 100 Mbps). W tym kontekście brakuje technicznej analizy porównawczej architektur systemów 4G i 5G.
- b) Wykaz skrótów („Abbreviations” nie jest zawarty w wykazie spisu treści).

- c) W tytule rozdziału 1.3 słowo „important” wydaje się zbędne.
- d) W rozdziale 1.3.3 słowo „linear” nie jest wyjaśnione i może powodować niejednoznaczny odbiór wśród czytelników zajmujących się np. metodami optymalizacji kombinatorycznej, gdzie hasło „linear models” podane skrótowo oznacza modele optymalizacyjne z liniową funkcją celu i warunkami ograniczającymi.
- e) W rozdziale 2 analiza właściwości metod znanych z literatury mogłaby być wzbogacona o analizę porównawczą najważniejszych cech (i ograniczeń) tychże rozwiązań np. w formie tabelarycznej.
- f) W niektórych rozdziałach rysunki mają ograniczoną czytelność w wyniku ich konwersji do postaci grafiki poddanej kompresji. Lepszym rozwiązaniem byłoby ich wstawienie w formie wektorowej. Problem dotyczy np. czytelności opisów osi rys. 5.37-5.44 czy czytelności rys. 7.9.
- g) Uwaga główna: w części poświęconej analizie charakterystyk proponowanego rozwiązania Doktorant, skupiając się na uwypukleniu tychże właściwości, nie prezentuje ich porównania z właściwościami rozwiązań znanych z literatury, co rodzi pytanie o powód tej decyzji.

Uwagi polemiczne

1. Praca dostarcza rozwiązań w zakresie mechanizmów automatyzacji wymiarowania zasobów sieci 5G w kontekście danych wejściowych dotyczących prognozowanych charakterystyk ruchu. Jako że przeprowadzona w rozprawie analiza nie uwzględnia specyficznych scenariuszy obejmujących np. awarie elementów systemu 5G i związaną z nimi potrzebę podtrzymania odpowiedniego poziomu świadczenia usług (przykładowo poprzez proaktywną rezerwację dodatkowych zasobów), nasuwa się pytanie o to czy (oraz w jaki sposób) opracowany schemat mógłby być rozszerzony w celu spełnienia tychże dodatkowych wymagań oraz o to, jak wymagania te przełożyłyby się na uzyskiwane wyniki (również w kontekście skalowalności).
2. Praca zawiera analizę efektywności proponowanego rozwiązania w oparciu o dane wejściowe dotyczące „codziennych” scenariuszy, tzn. z pominięciem specyficznych przypadków implikujących charakterystyki danych wejściowych dalece odmienne od normalnego stanu. Wobec tego warto byłoby przeanalizować na ile funkcjonalne jest rozwiązanie opracowane przez Doktoranta w kontekście uwzględnienia scenariuszy niestandardowych, lecz realnych takich jak np. wynikających z działania czynników zewnętrznych – np. sił natury: powodzie, pożary, itp., które niekoniecznie musiałyby prowadzić do awarii elementów systemu 5G, ale z pewnością powodowałyby wyraźną zmianę wzorca ruchu – np. co najmniej kilkukrotny wzrost natężenia ruchu (ang. „unusual traffic”) wynikający choćby ze znacznie zwiększonej potrzeby użytkowników uzyskania dostępu do informacji, bądź po prostu wzmożonej potrzeby wzajemnej komunikacji. W takiej sytuacji charakterystyka ruchu znacznie odbiegałaby od wzorców rozpatrywanych w rozprawie.

MPade

3. Od wprowadzenia rozwiązań 5G oficjalnie minęło już około pięć lat, co stanowi półmetek na osi czasu pomiędzy wdrożeniami rozwiązań kolejnych generacji odbywającymi się mniej więcej co dekadę. Nasuwa się więc pytanie o przewidywany okres użyteczności proponowanych przez Doktoranta rozwiązań oraz o zakres ewentualnych modyfikacji w kontekście ich potencjalnego wykorzystania w następnej – szóstej generacji, nad którą to prace stają się coraz bardziej zaawansowane.

Powyższe uwagi są w większości natury polemicznej i ogólnej mniejszej rangi i nie wpływają znacząco na moją sumaryczną pozytywną ocenę rozprawy.

4. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a/ nie spełniająca wymagań,
- b/ wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,
- c/ spełniająca wymagania,
- d/ wykraczająca ponad poziom zadawalający (spełniająca wymagania z nadmiarem),
- e/ wybitna?

Podsumowując, moja całościowa ocena rozprawy doktorskiej mgr inż. Dominika Dulasa jest **pozytywna**, a zawartość merytoryczna rozprawy w mojej opinii kwalifikuje ją do kategorii **c/ spełniająca wymagania** ustawowe stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę zatem o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Dominika Dulasa do publicznej obrony.

