

Politechnika Poznańska
Wydział Informatyki i Telekomunikacji,
Instytut Sieci Teleinformatycznych

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

przygotowana dla Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja
Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich

Tytuł rozprawy: **Admission control algorithms for future wireless networks**
Algorytmy sterowania przyjmowaniem zgłoszeń w sieciach bezprzewodowych przyszłości

Autor rozprawy: **mgr inż. Adam Flizikowski**

Promotorzy: prof. dr hab. inż. Tadeusz Wysocki

Dziedzina: nauki inżynieryjno-techniczne

Dyscyplina: informatyka techniczna i telekomunikacja

- **Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?**

Podstawowym celem, który postawił przed sobą Kandydat jest „*Analiza, Badania i Inteligentny Rozwój (w oparciu o wiedzę i innowacje) oraz ocena jakości algorytmów sterowania przyjmowaniem i przetwarzaniem zgłoszeń (zatorów) w sieciach bezprzewodowych przyszłości*”. Podjęty przez Doktoranta problem jest problemem aktualnym i ważnym, zarówno pod względem teoretycznym, jak i praktycznym.

Kandydat sformułował w rozprawie również dwa problemy badawcze, których rozwiązanie uważa za realizację założonego celu rozprawy.

W pierwszym problemie Doktorant zastanawia się, czy możliwe jest wprowadzenie modeli merytorycznych przydatnych w kontroli dostępu (i przeciążenia), opartych na istniejącym stanie wiedzy dotyczącym sieci bezprzewodowych. Do oceny ich jakości Kandydat zaproponował normy jakości określające różnicę pomiędzy modelem a rzeczywistością (zgodnie z definicją standardu $Q=||x-y||$), które pozwolą: i) ocenić stan, ii) wskazać kierunki rozwoju, iii) opracować alternatywne rozwiązania,

iv) prowadzić badania (z estymacją/ocena) oraz v) zaproponować nowe modele (trendy) kontroli w kierunku przejścia z 4G do 5G i kolejnych generacji?

Drugim problem dotyczy odpowiedzi na pytanie czy algorytmy kontroli dostępu oparte na deklaracjach 4G (DBAC) i pomiarach (MBAC) mogą zostać ponownie wykorzystane, z niezbędnymi modernizacjami, w sieciach 5G i kolejnych oraz czy pozwolą na dalszą optymalizację liczby użytkowników i zmniejszenie prawdopodobieństw (P_b , P_d) w stosunku do wartości znanych ze stanu badań?

W celu wykazania celu pracy i rozwiązania przyjętych problemów badawczych Kandydat sformułował szereg logicznie uporządkowanych zadań badawczych, które kolejno omówił w odpowiednich rozdziałach rozprawy doktorskiej.

Zadanie pierwsze polegało na odpowiedzi na pytanie jak zdefiniować kompletne, zrównoważone, kompleksowe ramy oceny innowacyjnych i zmodernizowanych algorytmów kontroli przeciążenia (w 4G/5G), które umożliwią odpowiednie działania optymalizacyjne dostosowujące przepływy strumień danych do bazowej przepustowości sieci. Celem tego zadania była poprawa możliwości niezawodnego prowadzenia testów laboratoryjnych z wykorzystaniem danych zebranych podczas testów terenowych. Zadanie to, zostało przedstawione w rozdziale piątym rozprawy.

Zadanie drugie dotyczyło odpowiedzi na pytanie w jakim stopniu quasi-optymalizacja parametrów i algorytmów kontroli dostępu i przeciążenia może zostać ulepszona dzięki połączeniu jej z inteligentnym, opartym na QoE, sterowaniem ruchem w sieciach multi-RAT. Zakładając, że w płaszczyźnie sterowania wykorzystane zostaną nowatorskie architektury kontrolerów RAN. Zadanie to, zostało przedstawione w rozdziale szóstym pracy.

Zadanie trzecie związane było z uzyskaniem odpowiedzi na pytanie w jakim stopniu wprowadzenie nowatorskich platform obliczeniowych Micro Edge Data Center (EMDC) w połączeniu z opartymi na AI/ML algorytmami przewidywania obciążenia i rozmieszczania dla autoskalowania CU-UP w zdezagregowanych wycinkach sieci 5G opartych na ORAN może poprawić dopuszczalny ruch? Zadanie to, zostało przedstawione w rozdziale siódmym rozprawy.

Zadanie czwarte polegało na próbie odpowiedzi na pytanie czy obecnie znane algorytmy Measurement-Based Access Control (MBAC), wspierane technikami AI/ML z reinforcement learning, MDP oraz z niezbędnymi modernizacjami, mogą zostać wykorzystane do ulepszenia rozwiązań CAC w systemach 4G/5G oraz czy umożliwią one dalszą ewolucję w kierunku pokrycia dodatkowych charakterystyk przyszłych sieci? Zadanie to, zostało przedstawione w rozdziale ósmym pracy.

Zadanie piąte dotyczyło odpowiedzi na pytanie jak zaprojektować i wdrożyć efektywnie środowisko optymalizacyjne, które wspierałoby definiowanie zrównoważonych, opartych na uczeniu się

algorytmów RRM CAC/CC w sieciach 5G/B5G do zastosowania w brzegowych mikrocentrach danych? Zadanie to, zostało opisane w rozdziale siódmym pracy.

Autor w pracy sformułował również następującą tezę: „Istniejące warunki techniczne w sieciach 5G/beyond-5G open-RAN mogą zostać poprawione, np. poprzez modyfikację algorytmów zarządzających zasobami, zarówno: i) w oparciu o deklaracje, jak i ii) wspierane przez pomiary - a oczekiwanym rezultatem będzie poprawa charakterystyk operacyjnych, w tym wydajności (jakości) sieci w odniesieniu do efektywnego wykorzystania zasobów radiowych, obliczeniowych i sieciowych”.

Rozpatrując przedstawioną przez Doktoranta tezę rozprawy, w kontekście wcześniej przytoczonego celu pracy oraz zdefiniowanych na jego podstawie problemów i zadań badawczych, uwzględam, że teza rozprawy została przez Autora dostatecznie jasno i precyzyjnie sformułowana.

- **Jaka jest przydatność rozprawy z punktu widzenia nauk technicznych, czy założenia przyjęte przez autora są uzasadnione?**

Technologia 5G, szczególnie koncepcja Open RAN jest obecnie jedną z wiodących technologii, która budzi duże zainteresowanie na rynku telekomunikacyjnym. Nadzieje obniżenia kosztów oraz zwiększenia elastyczności i efektywności sieci są dla operatorów wystarczającymi motywacjami do rozwijania rozwiązań w tym obszarze. Warto zwrócić uwagę, że również wiele badań naukowych dotyczy zarządzania zasobami, szczególnie w kontekście rozwiązań otwartych. Problemy podejmowane przez Doktoranta bardzo dobrze wpisują w te obszary, ponieważ dotyczą ważnych aspektów implementacyjnych zarządzania zasobami.

Aktualnie w wielu ośrodkach naukowo-badawczych i akademickich prowadzone są intensywne badania, których celem jest zwiększenie efektywności i elastyczności algorytmów zarządzania zasobami. Badania te obejmują zarówno aspekty implementacyjne, jak i teoretyczne.

Można zatem stwierdzić, że tematyka badań podejmowanych w rozprawie bardzo dobrze wpisuje w międzynarodowy nurt badań teoretycznych i aplikacyjnych prowadzonych w dziedzinie uprawianej przez Autora.

- **Czy autor rozwiązał postawione zagadnienie i czy użył właściwej do tego metody?**

Cel rozprawy został osiągnięty w wyniku przeprowadzenia następujących działań:

- Analiza stanu techniki w zakresie mechanizmów: warstwy fizycznej (PHY), warstwy łącza (MAC), technik dostępu wielokrotnego NOMA, sterowania ruchem w celu optymalizacji QoE w środowisku multi-RAT, a w szczególności algorytmów CAC w sieciach 4G/5G/beyond-5G.

- Wybór i modernizacja algorytmów kontroli dostępu w celu określenia wytycznych do badań własnych oraz założeń metodologicznych dla ich efektywniejszego wykorzystania w sieciach zgodnych ze standardami 5G oraz w sieciach nowej generacji.
- Zaprojektowanie i rozwój środowiska badawczego do prowadzenia własnych badań symulacyjnych, emulacyjnych i analitycznych oraz metodologii testowej wspierającej proces badawczy.
- Testowanie zmodyfikowanych algorytmów za pomocą metod analitycznych i symulacyjnych oraz zaproponowanie odpowiedniej metodologii projektowania i testowania algorytmów.

Przyjęte przez Autora metody wpisują się w szeroki nurt metod wykorzystywanych w zagadnieniach zarządzania zasobami radiowymi.

Potwierdzona praktyczność zaproponowanych metod, technik i algorytmów oraz numeryczna ocena ich jakości zawarta w rozprawie, pozwalają na stwierdzenie, że Doktorant rozwiązał postawione zagadnienie i użył do jego rozwiązania właściwej metody.

- **Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, konstrukcyjny), jaka jest jej pozycja w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?**

Rozprawa ma charakter doświadczalny z elementami konstrukcyjnymi.

Do rozwiązania zdefiniowanych problemów i zadań badawczych Kandydat wykorzystał metody analityczne i symulacyjne oraz prace doświadczalne dobrane odpowiednio do rodzaju problemu i zaproponowanych metod jego rozwiązania. Sposób rozwiązania problemów zaproponowany przez Doktoranta nie odbiega od stanu wiedzy czy poziomu techniki, reprezentowanych przez literaturę światową. Praca dobrze wpisuje się w nurt badań poświęconych sterowaniu dostępem w systemach bezprzewodowych.

- **Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora?**

Za najbardziej istotne i oryginalne wyniki Autora uważam:

- zaproponowanie algorytmów kontroli dostępu opartych na DBAC i MBAC dla sieci 4G/5G/B5G,
- zaproponowanie algorytmu sterowania ruchem opartego na QoE dla sieci multi-RAT,
- zaproponowanie modyfikacji algorytmu przewidywania obciążenia dla sieci 5G / B5G opartych na open-RAN,

- zaproponowanie nowego algorytmu kontroli dostępu dla sieci 5G, który może być wykorzystany w wirtualnej sieci mobilnej RAN 5G.

Prezentowane w rozprawie wyniki badań stanowią samodzielny i oryginalny dorobek Autora.

- **Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?**

Doktorant od kilku lat z powodzeniem zajmuje się podejmowaną problematyką. Wiele wyników przedstawionych w rozprawie zostało również opublikowanych w publikacjach, w których podlegały analizie i ocenie.

Podczas lektury rozprawy pojawiały się jednak pewne pytania i wątpliwości:

- W rozprawie nie znalazłem informacji na temat wielkości i sposobów przygotowania zbiorów danych, które stały się podstawą do uczenia sieci neuronowych. Warto byłoby skomentować wpływ danych syntetycznych i rzeczywistych na uczenie modelu?
- W pracy przedstawiono TRAINSCG, TRAINCGP, jednak nie wyjaśniono ich zasady działania, ani nie skomentowano w jaki sposób uzyskują małą wartość błędu. Warto byłoby to w jakiś sposób skomentować w rozprawie.
- Doktorant w pewnym miejscu pracy stwierdza, że wyniki uzyskane za pomocą programowania liniowego i uczenia maszynowego okazały się takie same. Czy to oznacza, że dane, które pozyskano do uczenia zostały wytworzone przez algorytm programowania liniowego?
- Kandydat przeprowadza badania symulacyjne tylko dla trzech wariantów adaptacyjnej modulacji i kodowania (tj. QPSK $\frac{1}{2}$, QPSK $\frac{3}{4}$, 16-QAM $\frac{1}{2}$). Nie przedstawiono efektywności widmowych tych metryk, czy w ogóle efektywność widmowa wybranych wariantów ma znaczenie w rozważanym modelu? Jak zmieniłyby się uzyskane wyniki i wnioski, gdyby zastosowano praktyczną tabelę MCS, np. z dokumentu: ETSI TS 138214 - v.15.3.0 tab. 5.1.3.1-2, str. 20?

W rozprawie można znaleźć czasem pewne nieścisłości tj. źle zapisana jednostkę efektywności widmowej na stronie 19, powinno być bit/s/Hz, czy powielenie błędów z przywoływanego źródła w tabeli 3. Pewnie nieścisłości można znaleźć również w opisach publikacji, w tym publikacji Autora (np. poz. 41, 51, 270).

W rozprawie nie znalazłem natomiast błędów merytorycznych, a zastrzeżenia lub wątpliwości, o których pisałem powyżej dotyczą raczej strony redakcyjnej pracy, lub mają charakter polemiczny i nie mogą mieć wpływu na ostateczną pozytywną ocenę pracy. Uważam, że recenzowana rozprawa zawiera

wiele oryginalnych wyników i wnosi wartościowy wkład w rozwój informatyki technicznej i telekomunikacji.

- **Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy autora i znajomości współczesnej literatury z zakresu dyscypliny naukowej, jakiej rozprawa dotyczy?**

Obszerna literatura przytoczona w pracy (spis publikacji zawiera 302 pozycje) świadczy o rozległej wiedzy i orientacji Autora w dziedzinie, którą uprawia. Zamieszczone pozycje z ostatnich lat (ponad 35% cytowanych prac zostało opublikowane po 2017 roku) potwierdzają, że Kandydat nie zajmuje się tematyką wyczerpaną, lecz przeciwnie, jest ona aktualna i inspirująca badawczo. O kompetencji Kandydata świadczy przywołanie w rozprawie 24 prac, w tym sześciu artykułów w czasopismach, których jest współautorem. Prace zostały opublikowane w następujących międzynarodowych czasopismach: *International Journal of Electronics and Telecommunications (lista MNiSW 70 pkt)*, *Mathematics in Computer Science (lista MNiSW 20 pkt.)*, *Studia Informatica. System and information technology (lista MNiSW 20 pkt.)*, *IEEE Networking Letters* oraz *IEEE Access (lista MNiSW 100 pkt.)*.

- **Czy autor wskazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?**

Poprawność redakcyjna tak obszernej rozprawy z pewnością była wyzwaniem. Analizując stronę redakcyjną pracy można zauważyć pewne nieścisłości i błędy. Niektóre rozdziały, np. dotyczące metodologii lub dodatkowej analizy wyników powinny zostać ograniczone i włączone w inne rozdziały, wiele treści jest rozwlekłych i niepotrzebnie wydłużonych. Również jasność przekazu mogłaby być poprawiona. W rozprawie widoczny jest brak spójności: niektóre podrozdziały, czy rozdziały, są osobnymi, niezależnymi od siebie fragmentami. Uwagę zwraca także niejednokrotnie niejasny i zbyt zdawkowy opis parametrów lub wyników prowadzonych eksperymentów oraz wykresy z wynikami badań, które są mało czytelne (np. Rys. 118, 119, 120) lub sformatowane w mało czytelnej postaci wykresów kolumnowych.

Niezależnie od przytoczonych uwag, uważam, że opisane wyniki, jak i rozwiązania, zostały przedstawione w rozprawie w sposób akceptowalny.

- **Czy i jaka jest przydatność rozprawy dla gospodarki narodowej?**

Wiele aspektów pracy dotyczy tematu bardzo aktualnego dla nowoczesnej gospodarki narodowej, jakim jest ORAN (ang. *Open Radio Access Network*). ORAN jest podejściem, w którym tradycyjna infrastruktura sieciowa opiera się na otwartych standardach i oprogramowaniu, co pozwala na większą

elastyczność i interoperacyjność w sieciach komórkowych. Dlatego odpowiedź na pytanie o przydatność rozprawy dotyczącej ORAN dla gospodarki narodowej będzie związana z korzyściami wynikającymi z nowoczesnych i bardziej otwartych rozwiązań w dziedzinie telekomunikacji pozwalających na zwiększenie konkurencyjności, zwiększenie dostępności szerokopasmowego Internetu i obniżenie kosztu dla użytkowników.

Można zatem stwierdzić, że rozwój innowacyjnych algorytmów zarządzania ruchem, w tym rozwiązania opisane w pracy, z pewnością wpisują się w nurt, który może przyczynić się do rozwoju i poprawy efektywności sieci komórkowych.

- **Czy rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy?**

Biorąc pod uwagę wnioski zaprezentowane w poprzednich punktach i wymagania podane w Artykule 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (z późniejszymi zmianami) uważam, że **rozprawa doktorska** mgr inż. Adama Flizikowskiego pt. „Algorytmy sterowania przyjmowaniem zgłoszeń w sieciach bezprzewodowych przyszłości (*Admission control algorithms for future wireless networks*)” zawiera **oryginalne rozwiązania problemu naukowego** oraz dowodzi, że **Kandydat posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja i posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.**

Wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Adama Flizikowskiego pt. „Algorytmy sterowania przyjmowaniem zgłoszeń w sieciach bezprzewodowych przyszłości” do publicznej obrony.



Podpis