

RECENZJA ROZPRAWY **dla Rady Dyscypliny** **Informatyka Techniczna i Telekomunikacja** **Politechniki Gdańskiej**

Tytuł rozprawy: Evaluation method of IP scheduled throughput for inter-eNB carrier aggregation and cloud based environment

Autor rozprawy: mgr inż. Arkadiusz Zięba

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Jarosław Sadowski, prof. PG

Niniejsza recenzja została sporządzona na podstawie pisma przewodniego Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Gdańskiej (PG), Pana dr. hab. inż. Jacka Raka, prof. PG z dnia 3 listopada 2025 r., na mocy *Uchwały nr 333/I/2025/ITiT Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja PG z dnia 21 października 2025 r.*, zgodnie z art. 187 ust. 1 i 2 *Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*, zwanej dalej *Ustawą* (Dz.U. 2024 poz. 1571) oraz z uwzględnieniem przepisów wewnętrznych PG, w szczególności określonych w *Wytycznych dla recenzentów rozpraw doktorskich* oraz *Zasad wyróżniania rozpraw doktorskich*.

Przedstawiona poniżej opinia na temat rozprawy doktorskiej została opracowana zgodnie z *Wytycznymi dla recenzentów rozpraw doktorskich na PG*, a struktura niniejszej recenzji odpowiada układowi określonemu w tych *Wytycznych* i obejmuje odpowiedzi na osiem zdefiniowanych w nich pytań.

1. Jaki jest problem naukowy (teza) rozprawy i czy został on trafnie i jasno sformułowany?

Problem naukowy podjęty przez mgr. inż. Arkadiusza Ziębę w rozprawie doktorskiej pt. „*Evaluation method of IP scheduled throughput for inter-eNB carrier aggregation and cloud based environment*” dotyczy zagadnienia dokładności pomiaru zaplanowanej przepływności protokołu IP (ang. *Internet Protocol (IP) scheduled throughput*) w nowoczesnych, rozproszonych architekturach sieci mobilnych LTE (ang. *Long Term Evolution*) oraz 5G NR (ang. *fifth-generation New Radio*).

Autor skoncentrował się w szczególności na scenariuszach wykorzystujących technologie podwójnej łączności DC (ang. *dual connectivity*) oraz między-stacyjnej (ang. *inter-eNB*) agregacji nośnych CA (ang. *carrier aggregation*). W tego typu systemach transmisja danych realizowana jest równolegle przez wiele węzłów sieciowych, które nie posiadają pełnej informacji o procesach zachodzących w pozostałych elementach infrastruktury. Skutkuje to trudnościami w poprawnym wyznaczeniu przepływności z punktu widzenia użytkownika końcowego oraz ograniczeniami

standardowych metod pomiarowych zdefiniowanych w specyfikacjach 3GPP, w szczególności TS 36.314 [12], 32.425 [20] i 32.450 [21].

W rozdziale 1.2 rozprawy Autor sformułował główną tezę (T1), zgodnie z którą opracowanie nowej metody pomiaru *IP scheduled throughput* umożliwi uzyskanie bardziej precyzyjnej estymacji przepływności w sieciach LTE/5G niż metody dotychczas stosowane i opisane w dokumentacji technicznej tych systemów. Teza ta została uszczegółowiona poprzez zestaw właściwości (T2–T6), które stanowią podstawę jej weryfikacji eksperymentalnej.

W ramach pracy Doktorant zaproponował nowy algorytm obliczeniowy, dokonał jego implementacji oraz przeprowadził szeroką walidację w różnych konfiguracjach sieciowych, uwzględniających m.in. zróżnicowaną jakość kanału radiowego, liczbę nośnych oraz liczbę użytkowników.

W mojej ocenie problem naukowy został sformułowany trafnie, jasno i w sposób jednoznaczny. Pan Arkadiusz Zięba prawidłowo zidentyfikował ograniczenia istniejących metod pomiarowych wynikające z przejścia od architektur scentralizowanych do rozproszonych oraz wskazał na potrzebę opracowania nowych metod estymacji parametrów wydajnościowych. Teza pracy jest spójna z przedstawioną motywacją badawczą, dobrze osadzona w aktualnym stanie rozwoju technologii LTE-Advanced (LTE-A) i 5G oraz posiada istotne znaczenie zarówno poznawcze, jak i praktyczne, w szczególności w kontekście monitorowania jakości usług QoS (ang. *quality of service*) oraz optymalizacji działania sieci komórkowych.

2. Czy Autor rozwiązał postawiony problem i czy użył do tego właściwych metod dowodząc, że posiadał umiejętności związane z metodyką i metodologią prowadzenia badań naukowych?

W mojej ocenie, mgr inż. Arkadiusz Zięba rozwiązał postawiony problem naukowy, a zastosowane podejście badawcze świadczy o bardzo dobrym opanowaniu metodyki i metodologii prowadzenia badań naukowych.

Układ pracy oraz sposób realizacji badań wskazują na metodyczne i konsekwentne podejście do rozwiązania zdefiniowanego problemu badawczego, analogiczne do klasycznego schematu postępowania naukowego. W pierwszym etapie Autor przeprowadził przegląd literatury oraz analizę stanu techniki, obejmującą zarówno rozwiązania standaryzacyjne 3GPP, jak i aktualne kierunki badań związane z pomiarem QoS/QoE (ang. *quality of experience*) w sieciach rozproszonych. Przegląd ten pozwolił na jednoznaczne wskazanie luki badawczej, związanej z niedostateczną dokładnością standardowych metod pomiaru *IP scheduled throughput* w środowiskach DC.

W kolejnym etapie Doktorant zaproponował oryginalne rozwiązanie w postaci nowej metody estymacji przepływności, uwzględniającej specyfikę rozproszonego przetwarzania danych oraz modyfikującej sposób wyznaczania składowych wolumenowych i czasowych. Opis zaproponowanej metody ma charakter uporządkowany i formalny – obejmuje zarówno założenia teoretyczne, jak i szczegółowe mechanizmy działania algorytmu.

Warto podkreślić, że Autor nie ograniczył się do rozważań teoretycznych, lecz dokonał implementacji zaproponowanego rozwiązania w środowisku rzeczywistym, tj. w systemach stacji bazowych eNB (ang. *evolved node B*). Praktyczne wdrożenie metody oraz jej wykorzystanie w rozwiązaniach firmy Nokia świadczą o wysokiej wartości aplikacyjnej przeprowadzonych badań.

Kluczowym elementem pracy jest szeroka i zróżnicowana walidacja eksperymentalna, obejmująca liczne scenariusze testowe. W analizach uwzględniono m.in. wpływ jakości kanału radiowego, liczby użytkowników, liczby nośnych, rodzaju protokołu transmisyjnego oraz

konfiguracji sieci (DC i non-DC). Badania zostały zaprojektowane w sposób umożliwiający zarówno ocenę dokładności proponowanej metody, jak i jej porównanie z metodą standardową.

Doktorant zastosował również spójne kryteria oceny (np. błąd względny) oraz odpowiednio dobrał scenariusze badawcze, co świadczy o świadomym i poprawnym podejściu metodologicznym. Uzyskane wyniki w sposób przekonujący potwierdzają postawioną tezę oraz wskazują na istotną poprawę dokładności pomiaru w stosunku do rozwiązań standardowych.

Podsumowując, należy stwierdzić, że mgr inż. Arkadiusz Zięba nie tylko rozwiązał postawiony problem badawczy, ale uczynił to przy wykorzystaniu właściwie dobranych metod badawczych, obejmujących analizę literatury, modelowanie, projektowanie algorytmu, implementację oraz weryfikację eksperymentalną. Całość pracy świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu Doktoranta do prowadzenia badań naukowych oraz o umiejętności rozwiązywania złożonych problemów o charakterze zarówno teoretycznym, jak i aplikacyjnym.

3. Czy tematyka rozprawy jest aktualna lub dostatecznie ważna?

Tematyka rozprawy doktorskiej mgr. inż. Arkadiusza Zięby należy uznać za aktualną oraz istotną zarówno z punktu widzenia naukowego, jak i aplikacyjnego.

Rozprawa wpisuje się w obszar badań związanych z analizą i oceną wydajności i jakości nowoczesnych systemów radiokomunikacyjnych LTE-A oraz 5G NR, a pośrednio również kolejnych generacji sieci mobilnych. Wraz z przejściem od architektur scentralizowanych do rozproszonych, wykorzystujących mechanizmy takie jak DC czy CA, pojawiły się nowe wyzwania związane z poprawnym pomiarem parametrów QoS, w tym przepływności danych postrzeganej przez użytkownika końcowego.

Zagadnienie dokładnej estymacji przepływności *IP scheduled throughput* ma charakter fundamentalny, ponieważ parametr ten stanowi jedną z kluczowych miar QoS, a pośrednio również miar subiektywnych QoE. Jego poprawne wyznaczenie ma bezpośredni wpływ na ocenę wydajności sieci, procesy optymalizacji zasobów radiowych oraz projektowanie i wdrażanie nowych funkcjonalności w systemach komórkowych.

Należy również podkreślić, że dynamiczny rozwój sieci 5G, w tym wdrażanie architektur rozproszonych oraz rozwiązań typu przetwarzanie brzegowe (ang. *edge computing*), powoduje, że ograniczenia standardowych metod pomiarowych (np. zgodnych z 3GPP TS 36.314) stają się coraz bardziej widoczne. W tym kontekście podejmowanie badań nad nowymi metodami estymacji parametrów wydajnościowych jest nie tylko uzasadnione, ale wręcz konieczne.

Dodatkowym argumentem potwierdzającym wagę podjętej problematyki jest jej bezpośrednia implementacja w rozwiązaniach przemysłowych (systemy firmy Nokia), co świadczy o wysokim stopniu użyteczności zaproponowanych rozwiązań oraz ich znaczeniu dla praktyki inżynierskiej.

Reasumując, należy stwierdzić, że tematyka rozprawy jest w pełni aktualna, dobrze osadzona w obecnych kierunkach rozwoju technologii telekomunikacyjnych oraz dostatecznie ważna, zarówno z punktu widzenia badań naukowych, jak i zastosowań praktycznych.

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

Oryginalny dorobek naukowy mgr. inż. Arkadiusza Zięby polega przede wszystkim na opracowaniu nowej metody estymacji przepływności *IP scheduled throughput* w rozproszonych architekturach sieci komórkowych LTE i 5G, w szczególności dla scenariuszy wykorzystujących DC

oraz między-stacyjną CA. Zaproponowane rozwiązanie stanowi odpowiedź na zidentyfikowane ograniczenia standardowych metod pomiarowych (np. zgodnych z 3GPP TS 36.314), które w warunkach rozproszonego przetwarzania danych nie zapewniają wystarczającej dokładności estymacji.

Na poziomie merytorycznym wkład Autora obejmuje:

- sformułowanie nowego podejścia do wyznaczania przepływności, uwzględniającego specyfikę współpracy wielu węzłów sieciowych (głównej MeNB (ang. *master eNB*) i pomocniczej SeNB (ang. *secondary eNB*) stacji bazowej),
- opracowanie algorytmu estymacji parametrów wolumenowych i czasowych, który lepiej odzwierciedla rzeczywisty przebieg transmisji danych,
- wprowadzenie spójnej metodyki oceny dokładności, opartej na analizie błędu względnego z uwzględnieniem różnych punktów odniesienia (warstwa aplikacyjna oraz warstwa sieciowa),
- przeprowadzenie implementacji rozwiązania w rzeczywistym środowisku systemowym oraz jego walidację w szerokim zakresie scenariuszy testowych.

Istotnym elementem dorobku jest również jego udokumentowanie w postaci zgłoszeń patentowych i uzyskanych patentów [13, 17, 60], co wskazuje na innowacyjność oraz potencjał wdrożeniowy zaproponowanych rozwiązań. Ponadto wyniki badań zostały przedstawione w publikacjach naukowych [27, 47], co potwierdza ich wartość poznawczą oraz poddanie ocenie środowiska naukowego.

Znaczenie poznawcze pracy polega na pogłębieniu wiedzy w zakresie pomiaru i interpretacji przepływności w rozproszonych systemach radiokomunikacyjnych, a także na wskazaniu ograniczeń dotychczasowych metod oraz sposobów ich przewyższenia. Autor wnosi wkład w rozwój metod analizy QoS/QoE w nowoczesnych sieciach mobilnych, co ma znaczenie dla dalszych badań w tym obszarze, w tym również w kontekście systemów kolejnych generacji.

Z kolei przydatność praktyczna opracowanego rozwiązania jest szczególnie istotna. Zaproponowana metoda została zaimplementowana w rozwiązaniach przemysłowych (systemy firmy Nokia) i znajduje zastosowanie w rzeczywistych sieciach komórkowych. Umożliwia ona bardziej precyzyjne monitorowanie wydajności sieci oraz może stanowić podstawę do optymalizacji mechanizmów zarządzania zasobami radiowymi i poprawy jakości usług świadczonych użytkownikom końcowym.

Reasumując, dorobek mgr. inż. Arkadiusza Zięby ma charakter oryginalny, spójny i dobrze udokumentowany, a jego znaczenie należy ocenić wysoko – zarówno w aspekcie poznawczym, jak i aplikacyjnym.

5. Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy Autora, wiedzy na zaawansowanym poziomie, o charakterze poznawczym dla dziedziny nauk technicznych oraz o charakterze szczegółowym, odpowiadającej obszarowi prowadzonych badań naukowych?

W mojej opinii, rozprawa doktorska mgr. inż. Arkadiusza Zięby świadczy o posiadaniu przez Autora wiedzy na zaawansowanym poziomie, zarówno w zakresie podstawowym dla dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych, jak i w obszarze szczegółowym, bezpośrednio związanym z tematyką prowadzonych badań.

Rozprawa jest procedowana w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja, co znajduje pełne odzwierciedlenie w jej treści. Autor

wykazuje bardzo dobrą znajomość podstawowych zagadnień związanych z funkcjonowaniem współczesnych systemów radiokomunikacyjnych, w tym architektury sieci LTE i 5G NR, zasad transmisji danych, mechanizmów planowania zasobów radiowych oraz metod oceny jakości usług (QoS/QoE). Wiedza ta stanowi solidny fundament dla podejmowanych w pracy rozważań o charakterze bardziej zaawansowanym.

Na szczególne podkreślenie zasługuje poziom wiedzy specjalistycznej Doktoranta, obejmujący m.in. zagadnienia związane z funkcjonowaniem DC, CA, synchronizacją pomiarów w architekturach rozproszonych oraz interpretacją liczników pomiarowych definiowanych w standardach 3GPP. Autor nie tylko poprawnie posługuje się aparatem pojęciowym właściwym dla tej dziedziny, ale również potrafi krytycznie analizować ograniczenia istniejących rozwiązań oraz proponować ich usprawnienia.

Istotnym elementem potwierdzającym wysoki poziom wiedzy jest również umiejętność łączenia aspektów teoretycznych z praktycznymi, co znajduje odzwierciedlenie zarówno w zaproponowanej metodzie, jak i w jej implementacji w rzeczywistym środowisku systemowym. Doktorant wykazuje się znajomością zarówno warstwy koncepcyjnej (modele, metody estymacji, definicje metryk), jak i warstwy implementacyjnej (liczniki PM (ang. *performance management*), mechanizmy działania stacji bazowych, środowisko testowe).

Analiza treści rozprawy pozwala stwierdzić, że Autor posiada również dobrą orientację w aktualnym stanie wiedzy, co potwierdza wykorzystanie aktualnych źródeł literaturowych oraz odniesienia do obowiązujących specyfikacji standaryzacyjnych.

Reasumując, należy stwierdzić, że rozprawa w pełni potwierdza, iż mgr inż. Arkadiusz Zięba posiada wiedzę na zaawansowanym poziomie, zarówno o charakterze podstawowym dla dziedziny nauk inżyniersko-technicznych, jak i szczegółowym, odpowiadającym dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja oraz tematyce prowadzonych badań.

6. Czy rozprawa obejmuje najnowsze osiągnięcia nauki i świadczy o znajomości współczesnej literatury z dyscypliny naukowej, której dotyczy?

W mojej ocenie, rozprawa doktorska mgr. inż. Arkadiusza Zięby obejmuje aktualne osiągnięcia nauki oraz świadczy o dobrej znajomości współczesnej literatury przedmiotu w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

Wśród 63 cytowanych prac można wyróżnić: 17 artykułów naukowych, 22 referaty konferencyjne, 1 monografię, 14 dokumentów standaryzacyjnych 3GPP, 5 innych raportów, 3 patenty oraz 1 odwołanie do strony internetowej oprogramowania iPerf. Istotną część stanowią publikacje naukowe i raporty techniczne, które w obszarze telekomunikacji mobilnej stanowią podstawowe źródło wiedzy technicznej i odniesienia dla prowadzonych badań.

Zdecydowana większość cytowanych prac pochodzi z ostatnich 10 lat (38 prac – 60%, w tym 14 prac – 22% z ostatnich 5 lat), co wskazuje na aktualność wykorzystanych źródeł oraz właściwe osadzenie rozprawy w bieżącym stanie wiedzy. Warto podkreślić, że w przypadku dokumentów standaryzacyjnych 3GPP nie wskazano rocznika.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że Autor nie ogranicza się do przywołania literatury, lecz prowadzi krytyczną analizę istniejących rozwiązań, w szczególności w zakresie metod pomiaru *IP scheduled throughput* oraz ich ograniczeń w środowiskach rozproszonych. Analiza ta obejmuje zarówno podejścia opisane w literaturze naukowej, jak i rozwiązania wynikające ze standardów technicznych, co jest właściwe dla prac realizowanych w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

Rozprawa odnosi się do aktualnych kierunków rozwoju sieci mobilnych, takich jak architektury DC, CA, przetwarzanie brzegowe oraz zagadnienia związane z oceną QoS/QoE. Wskazuje to na dobrą orientację Autora w najnowszych trendach badawczych i technologicznych.

Jednocześnie należy zauważyć, że zasadniczy ciężar odniesień literaturowych spoczywa na źródłach anglojęzycznych, co jest typowe i właściwe dla tej dziedziny. Dobór literatury można uznać za adekwatny do tematyki rozprawy, a jej zakres – za wystarczający do uzasadnienia podjętego problemu badawczego oraz zaproponowanego rozwiązania.

Reasumując, należy stwierdzić, że rozprawa obejmuje aktualny stan wiedzy oraz najnowsze osiągnięcia nauki w analizowanym obszarze, a także świadczy o właściwej znajomości współczesnej literatury przedmiotu przez mgr. inż. Arkadiusza Ziębę.

7. Jakie są wady i słabe strony rozprawy?

Pomimo ogólnie wysokiej oceny rozprawy, należy wskazać również jej pewne wady i słabsze strony.

W pierwszej kolejności można zauważyć, że część zagadnień została przedstawiona w sposób dość syntetyczny, co w niektórych miejscach utrudnia pełne odtworzenie toku rozumowania Autora. Dotyczy to w szczególności opisu niektórych elementów zaproponowanej metody oraz przyjętych założeń modelowych, które mogłyby zostać szerzej uzasadnione lub zilustrowane dodatkowymi przykładami.

Pewnym ograniczeniem pracy jest również niewystarczająco pogłębiona analiza porównawcza z innymi metodami opisanymi w literaturze naukowej. Autor koncentruje się przede wszystkim na porównaniu zaproponowanego rozwiązania z metodą standardową przewidzianą dla systemów LTE-A oraz 5G NR w trybie NSA (ang. *non-standalone*) zgodnie ze specyfikacjami 3GPP (w szczególności TS 36.314 [12], 32.425 [20], 32.450 [21]). Jest to w pełni uzasadnione z punktu widzenia aplikacyjnego, jednak rozszerzenie analizy o inne podejścia badawcze mogłoby dodatkowo wzmocnić warstwę naukową rozprawy.

Rozwijając powyższą uwagę, można stwierdzić, że w rozprawie brak jest również jednoznacznego odniesienia do architektury SA (ang. *standalone*) 5G NR bazującej na NG-RAN (ang. *Next Generation Radio Access Network*) oraz metod pomiaru przepływności zdefiniowanych dla systemu 5G NR. Należy przy tym zauważyć, że zaproponowana przez Doktoranta metoda odnosi się bezpośrednio do specyfikacji 3GPP TS 36.314 [12] dla architektury E-UTRAN (ang. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*), a więc znajduje naturalne zastosowanie w sieciach LTE, LTE-A i LTE-A Pro oraz w scenariuszach 5G w trybie NSA. Pomimo że w wykazie literatury pojawia się odwołanie do specyfikacji 3GPP TS 38.314 [11] dedykowanej dla 5G, referencja ta nie jest bezpośrednio wykorzystana/cytowana w treści rozprawy. Podobnie odwołania do specyfikacji TS 28.552 [4] i 28.554 [48] dla 5G NR, które pełnią analogiczną rolę jak TS 32.425 [20] i 32.450 [21] dla systemu LTE bazującego na E-UTRAN, są ograniczone i mają charakter ogólny. W konsekwencji zaproponowana metoda – choć skutecznie zweryfikowana dla systemów LTE-A oraz scenariuszy 5G NSA – nie została jednoznacznie uogólniona ani osadzona w kontekście architektury 5G SA i NG-RAN. Uzupełnienie pracy o analizę możliwości zastosowania opracowanej metody w środowisku 5G SA stanowiłoby wartościowe rozszerzenie jej zakresu oraz dodatkowo wzmocniłoby jej wymiar poznawczy.

Ubolewać można, że wartościowe rozwiązanie przedstawione w rozprawie przez Doktoranta nie znalazło szerszego odzwierciedlenia w dorobku publikacyjnym (poza [27, 47]), co było zapewne związane z procedowaniem aplikacji patentowych. Uwzględniając praktyczne aspekty proponowanego rozwiązania, mogłoby ono potencjalnie stanowić podstawę wartościowej modyfikacji i/lub rozszerzenia odpowiednich specyfikacji 3GPP w zakresie pomiaru przepustowości.

Można także zwrócić uwagę na fakt, że znaczna część walidacji eksperymentalnej została przeprowadzona w środowisku laboratoryjnym, co – choć typowe dla tego rodzaju badań – ogranicza możliwość bezpośredniego odniesienia wyników do w pełni rzeczywistych warunków eksploatacyjnych sieci. Uzupełnienie pracy o szerszą analizę danych z sieci komercyjnych mogłoby stanowić wartościowe rozszerzenie przedstawionych wyników. W przeprowadzonych badaniach Doktorant wykorzystał programowalną macierz tłumików, która zapewniała w dużej mierze statyczny charakter środowiska radiowego. Wykorzystanie sprzętowego emulatora kanału (typu *fading channel emulator*) pozwoliłoby na uwzględnienie różnych zjawisk propagacyjnych i dynamicznych zmian zachodzących w kanale radiowym. Badania przeprowadzone z wykorzystaniem takiego emulatora mogłyby w lepszy sposób odzwierciedlać warunki występujące w rzeczywistych kanałach radiowych.

W aspekcie redakcyjnym rozprawa jest zasadniczo poprawna, jednak pojawiają się drobne nieścisłości terminologiczne oraz stylistyczne, a także miejscami brak konsekwencji w stosowaniu skrótów i oznaczeń, co może wpływać na czytelność wybranych fragmentów pracy. Poniżej wyszczególniono kilka drobnych uwag, które zauważono podczas recenzji pracy:

- Sekcja „LIST OF IMPORTANT SYMBOLS AND ABBREVIATIONS” obejmuje jedynie wykaz skrótów a nie symboli wykorzystanych we wzorach.
- Stosowanie inżynierskiej notacji (np. $\times 1000$ [kbit/s], [Mbps]) we wzorach, np. (1.1), (1.2), (3.1), zamiast typowej dla publikacji naukowych.
- Stosowanie różnego stylu odwołań do równań, np. “... Equations 1.1 and 1.2 ...” (str. 12), “... equations (3.1) and (3.2) ...” (str. 39), “... Eq. 3.2 ...” (str. 49) zamiast jednolitego, np. “... Equations (1.1) and (1.2) ...” lub po prostu “... (1.1) and (1.2) ...”. W publikacjach naukowych przyjęło się, że odwołanie do wzorów powinno odbywać się zawsze poprzez podanie numeru w nawiasach.
- Stosowanie różnej pisowni jednostek fizycznych – zbliżonej dla systemu SI (np. [kbit/s] – Eq. (1.1), [kbits] – Figure 4.4) lub anglosaskiego stylu technicznego (np. [Mbps] – Eq. (3.3)), zamiast jednolitego podejścia (np. [kb/s], [kb], [Mb/s]).
- Brak w tekście rozprawy cytowania pracy [11], które znajduje się w wykazie literatury.
- Brak jednolitego stylu używania skrótów terminów:
 - Używanie skrótów terminów przed ich wyjaśnieniem (tj. podaniem pełnej nazwy), np. SINR (str. 57 i 58, wyjaśnienie – str. 74).
 - Nie wprowadzenie skrótu przy pierwszym wystąpieniu nazwy terminu, np. skrót CA wprowadzono w trzecim akapicie na str. 8, podczas gdy termin “carrier aggregation” został po raz pierwszy użyty w akapicie pierwszym na str. 8.
 - Wielokrotne wprowadzenie tych samych skrótów terminów, np. NR (str. 8, 24, 27), CA (str. 8, 9, 18, 40, 73, 76, 78, 82, 89, 92), DC (str. 8, 36, 83, 92), BTS (str. 9, 17), eNB (str. 10, 17), MAC (str. 18, 28), RRH i RU (str. 21, 27), EN-DC (str. 23, 27), TCP i UDP (str. 77, 83).
 - Używanie pełnych nazw zamiast wprowadzonego skrótu, np. CA pierwszy raz wyjaśniono na str. 8, podczas gdy pełna nazwa terminu “carrier aggregation” została użyta 19 razy w rozprawie; PM wyjaśniono na str. 10, podczas gdy termin „performance management” jest stosowany w dalszej części pracy (str. 30 dwukrotnie).
 - Różny styl wyjaśniania skrótów, np. “... RRH (Remote Radio Head) ...” lub “... remote radio heads (RRHs) ...”, zamiast jednolitego podejścia.

- Na str. 77 i 78 wprowadzono skróty wykorzystywane przy opisie wyników w tabelach prezentowanych w dalszej części. Skróty te nie zostały jednak uwzględnione w wykazie skrótów na str. 6 i 7.
- Generalnie skrót powinien być wprowadzony przy pierwszym wystąpieniu pełnej nazwy terminu i stosowany do końca pracy zamiast jego pełnej nazwy.
- Błąd terminologiczny na str. 17 – powinno być NG-RAN (ang. *Next Generation Radio Access Network*) zamiast 5GR (ang. *5G Radio Access Network*).
- Mało czytelne niektóre rysunki, np. Figure 3.10, 5.39–5.47. Większy rozmiar rysunków rozwiązałby problem czytelności.
- Niepotrzebne stosowanie dokładności dwóch liczb po przecinku przy opisie osi rzędnych na większości wykresów, np. Figures 5.6–5.9, 5.10–5.25, 5.27–5.36, 5.48–5.51, A1.1–A1.8, A2.1–A2.24, A3.1–A3.4,
- Stosowanie różnych separatorów dziesiętnych – przecinka (podejście nietypowe dla tekstów anglojęzycznych) przy opisie osi rzędnych na większości wykresów, np. Figures 5.6–5.9, 5.10–5.25, 5.27–5.36, 5.48–5.51, A1.1–A1.8, A2.1–A2.24, A3.1–A3.4, oraz kropki (podejście typowe) – przy prezentacji wyników w tekście i w tabelach.
- Niejednolity styl opisu źródeł literaturowych. Niektóre referencje nie są opisane w sposób kompletny, np. przy dokumentach standaryzacyjnych 3GPP [1, 4, 11, 12, 20–22, 24, 46, 48, 56–59] nie podano rocznika, dla publikacji [5, 6, 7, 38, 42] nie podano woluminu i numeru czasopisma (vol., no.), w pracach [35, 44, 45] zastosowano inny styl opisu referencji, dla [29] podano niepełną nazwę konferencji, dla [40] nie podano nazwy konferencji.

Reasumując, wskazane uwagi mają charakter uzupełniający i porządkujący i nie wpływają na ogólną, pozytywną ocenę rozprawy mgr. inż. Arkadiusza Zięby, która stanowi wartościowe i oryginalne opracowanie naukowe.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę

- a/ nie spełniająca wymagań,
- b/ wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,
- c/ zadowolająco spełniająca wymagania,
- d/ wyraźnie wykraczająca poza poziom przeciętny (spełniająca wymagania z nadmiarem),
- e/ wybitna.

Na podstawie przeprowadzonej analizy rozprawy doktorskiej mgr. inż. Arkadiusza Zięby stwierdzam, że przedłożona praca **wyraźnie wykracza poza poziom przeciętny (kategoria d)**.

Doktorant wykazał się dogłębną wiedzą w zakresie podejmowanej problematyki oraz bardzo dobrym opanowaniem warsztatu badawczego. Podjęty temat ma istotne znaczenie naukowe i aplikacyjne, a jego realizacja wymagała rozwiązania złożonych problemów naukowo-technicznych związanych z oceną przepływności w nowoczesnych systemach radiokomunikacyjnych. Autor prawidłowo sformułował tezę badawczą, którą następnie konsekwentnie zweryfikował przy użyciu właściwie dobranych metod i narzędzi badawczych.

Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że zaproponowane rozwiązanie ma nie tylko charakter teoretyczny, ale również istotny wymiar praktyczny. Zostało ono zaimplementowane w rzeczywistym środowisku systemowym oraz znalazło zastosowanie w rozwiązaniach stacji bazowych firmy Nokia. Dodatkowo dorobek Doktoranta obejmuje współautorstwo zgłoszeń

patentowych i uzyskanych patentów, co stanowi potwierdzenie innowacyjności opracowanego podejścia oraz jego potencjału wdrożeniowego.

Doktorant wykazał się inicjatywą twórczą, umiejętnością samodzielnego rozwiązywania problemów oraz zdolnością prowadzenia badań na wysokim poziomie merytorycznym. Uwzględniając powyższe, należy stwierdzić, że rozprawa spełnia wszystkie ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim **z wyraźnym nadmiarem**.

Mając na uwadze wysoki poziom naukowy rozprawy, jej istotne znaczenie praktyczne oraz udokumentowany dorobek patentowy Doktoranta, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Arkadiusza Zięby.

Warszawa, dn. 18 marca 2026 r.


Jan Kelner