



Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgr inż. Arkadiusza Zięby pt.

**„Evaluation method of IP Scheduled Throughput for Inter-eNB  
Carrier Aggregation and Cloud based environment”**

Podstawą prawną do przygotowania niniejszej recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Gdańskiej, dr hab. inż. Jacka Raka, prof. PG, z dnia 05.11.2025 r.

Recenzowana rozprawa doktorska powstała pod kierunkiem promotora, dr hab. inż. Jarosława Sadowskiego, prof. PG, i została przedłożona Radzie Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Gdańskiej w trybie zgodnym z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. 2022 r., poz. 574, z późniejszymi zmianami). Rolę promotora pomocniczego pełnił dr inż. Martin Kollar.

Przedłożona do recenzji rozprawa mgr inż. Arkadiusza Zięby pt. „Evaluation method of IP Scheduled Throughput for Inter-eNB Carrier Aggregation and Cloud based environment” porusza zagadnienia związane z dokładnym pomiarem przepływności IP, kluczowej miary jakości usług QoS dla użytkownika końcowego w radiowej sieci dostępowej E-UTRAN, w kontekście nowoczesnych rozproszonych architektur sieciowych. Badania analizują ograniczenia stosowania przepływności IP zdefiniowanej w 3GPP TS 36.314 w tradycyjnych sieciach LTE w porównaniu z topologiami Dual Connectivity (DC). Otrzymane wyniki przyczyniają się do głębszego zrozumienia pomiaru przepływności IP w nowoczesnych sieciach bezprzewodowych i dostarczają praktyczne rozwiązania w celu zwiększenia jakości usług w środowiskach rozproszonych z wykorzystaniem topologii DC. Co równie istotne opracowane metody zostały z powodzeniem zintegrowane z sieciami komórkowymi w urządzeniach sprzętowych firmy Nokia wdrożonych na całym świecie. Pozwala to stwierdzić, że zagadnienia poruszane przez autora rozprawy są ważne z punktu widzenia najnowszych generacji systemów komórkowych, umożliwiając poprawę jakości usług QoS oraz efektywniejsze wykorzystanie zasobów radiowych.

Rozprawa liczy 219 stron i została podzielona na sześć rozdziałów, uzupełnionych pięcioma załącznikami. Zasadniczą treść rozprawy można podzielić na dwie części, pierwszą obejmującą rozdziały 1-4 i prezentującą analizowany problem od strony teoretycznej oraz proponowane jego rozwiązanie oraz drugą, zawierającą rozdział 5 i prezentującą obszerne wyniki testów walidujących jego skuteczność.

Rozdział 1 stanowi wstęp, w którym autor motywuje wybór tematyki swoich badań, definiuje główną tezę rozprawy oraz podsumowuje strukturę rozprawy.

W rozdziale 2 przedstawiono porównanie architektur sieci komórkowych czwartej oraz piątej generacji na przykładzie systemu LTE (Long Term Evolution), w którym topologie DC zasadniczo nie są stosowane oraz systemu NR (New Radio), w którym takie topologie znajdują zastosowanie. Porównano ich wady oraz zalety, wskazując dążenie do decentralizacji architektur sieci komórkowych, bazujących na rozwiązaniach chmurowych. Przeanalizowano również transformację standardu LTE w kierunku systemów rozproszonych, wskazując równocześnie wyzwania związane z dokładnymi pomiarami przepustowości ruchu IP, które pojawiają się w takich rozwiązaniach. Analizując topologię systemu NR podkreślono wyzwania związane z pomiarami jakości usług wynikające z jego zdecentralizowanej architektury. Dokonano również przeglądu prac naukowych dotyczących potencjalnych rozwiązań tego problemu, wskazując ich niedoskonałości oraz potrzebę opracowania nowych metod, którym poświęcona jest recenzowana rozprawa.

Rozdział 3 poświęcony jest omówieniu metod pomiaru przepustowości strumieni IP, stosowanych w sieciach komórkowych. W pierwszej kolejności autor przedstawia rozwiązania klasyczne, bazujące na standardzie 3GPP, powszechnie wykorzystywane w obecnie funkcjonujących sieciach komórkowych do pomiaru przepustowości strumieni IP i bazujące na pomiarach wolumenu danych oraz czasu transmisji dla indywidualnych użytkowników. Wskazuje jednocześnie, że nie powinny one bezkrytycznie być stosowane w przypadku topologii DC, ponieważ prowadzą do znacznych niedokładności, co pokazane zostało na czytelnych przykładach. Korzystając z nich, autor wnikliwie analizuje przyczyny tych niedokładności. W konsekwencji, proponuje dwa nowe podejścia do tego problemu, pierwsze, bardziej dokładne lecz o znacznej złożoności oraz drugie, uproszczone dzięki wprowadzeniu określonych aproksymacji. Następnie szczegółowo wyjaśnia założenia przyjęte przy konstruowaniu tych mechanizmów oraz określa styki, na których możliwa jest analiza przepustowości pozwalająca na określenie skuteczności istniejących oraz proponowanych metod pomiarów przepustowości strumieni IP.

Rozdział 4 zawiera przede wszystkim opis sposobu implementacji zaproponowanych uprzednio metod. Na początku zaprezentowano analizę rozwiązań znanych z literatury, wskazując jednak na ich negatywny wpływ na wydajność stacji bazowych eNB, który potwierdził tylko konieczność opracowania rozwiązań alternatywnych. Następnie zbadano zachowanie „tradycyjnego” systemu LTE, który zmodyfikowano przez wprowadzenie topologii DC, jednak bez zmiany oryginalnych mechanizmów pomiaru przepustowości strumieni IP. Wykazano, że nie są one w stanie zapewnić wydajnego funkcjonowania mechanizmów kolejowania systemu w nowej konfiguracji, co potwierdza potrzebę

zastosowania nowego podejścia do wyznaczania tych miar, zintegrowanego z algorytmami sterowania przepływem w sieci dostępu radiowego. W dalszej części rozdziału uzasadniono możliwość zastosowania uproszczonej, stosującej określone aproksymacje, metody pomiaru przepustowości strumieni IP wraz ze zmodyfikowanym algorytmem sterowania przepływem. Pokazano też szczegóły jej implementacji, podkreślając niezawodność działania nowych sposobów wyznaczania wolumenu danych oraz czasu transmisji, przekładających się w efekcie na poprawę jakości usług.

W rozdziale 5 zaprezentowano wyniki uzyskane przy zastosowaniu standardowych oraz opracowanych na potrzeby recenzowanej rozprawy doktorskiej metod pomiarów przepustowości strumieni IP, zaimplementowanych w rzeczywistym systemie komórkowym. Służą one przede wszystkim stwierdzeniu, czy tezy postawione w rozdziale 1 zostały osiągnięte przy założeniach sformułowanych w rozdziale 4. W pierwszej kolejności opisano wykorzystaną do weryfikacji platformę sprzętową zbudowaną w oparciu o klaster stacji bazowych eNB firmy Nokia, do których autor rozprawy miał dostęp, oraz przedstawiono sposoby generowania ruchu sieciowego o zmiennej przepływności przy założonych ograniczeniach. Następnie przedstawiono wyniki pomiarów uzyskanych przy zastosowaniu standardowych oraz zaproponowanych w rozprawie metod dla różnych modeli ruchu sieciowego oraz różnych konfiguracji sieci. W dalszej kolejności zaprezentowano wyniki uzyskane przy założeniu zmiennej jakości kanału radiowego (dużej oraz średniej skali), co jest nieodłączną cechą systemów komórkowych. Rozważono również wpływ obciążenia sieci na dokładność wyników uzyskiwanych z zastosowaniem nowych metod pomiarów przepustowości strumieni IP.

Rozdział 6 stanowi podsumowanie, w którym autor podkreśla najistotniejsze osiągnięcia zaprezentowane w rozprawie, wskazując jednocześnie zagadnienia warte dalszych badań.

Należy podkreślić wysoki poziom edytorski recenzowanej rozprawy. Została napisana w języku angielskim, bardzo poprawnie pod względem językowym i stylistycznym. Poza kilkoma błędami literowymi i interpunkcyjnymi, recenzent nie doszukał się innych nieprawidłowości.

Piśmiennictwo cytowane przez autora rozprawy liczy 63 pozycje, wyłącznie w języku angielskim. Piśmiennictwo zostało dobrane poprawnie a znaczna liczba pozycji świadczy o dobrym rozeznaniu autora w problematyce prowadzonych badań doktorskich i znajomości „state of the art”.

Teza postawiona przez doktoranta brzmi następująco: *Opracowanie nowych metod estymacji przepływności w systemach komórkowych LTE oraz 5G NR umożliwia zwiększenie ich dokładności w porównaniu do metod standardowych i zalecanych do wykorzystania w tych systemach.* Pomimo, że autor definiuje dodatkowo pięć tez szczegółowych, zdaniem recenzenta teza główna nie oddaje dokładnie charakteru prowadzonych badań, nie precyzując, że dotyczą one przede wszystkim przypadku topologii typu Dual Connectivity (DC).

Jak wskazano w początkowym fragmencie recenzji, poruszana problematyka jest ważna wobec rosnących wymagań stawianych kolejnym generacjom systemów komórkowych oraz

oczekiwać ich użytkowników. Ponieważ począwszy od 4. generacji (LTE/LTE-A) protokół IP jest podstawowym protokołem sieciowym stosowanym w systemach komórkowych, zagadnienia związane z estymacją przepływności strumieni danych IP są kluczowe z punktu widzenia efektywnego działania algorytmów kolejkowania i przydziału zasobów oraz oceny wydajności sieci. Decydują one w dużej mierze o jakości obsługi QoS, parametrze istotnym zarówno z punktu widzenia użytkowników jak i operatorów sieci komórkowych. Niezadowoleni użytkownicy mogą bowiem migrować do innych operatorów, pozbawiając zysków tych dotychczasowych w przypadku gdy na przykład uzyskiwane przepływności nie są zadowalające dla użytkowników (abonentów).

Stosowane metody badawcze oceniam jako w pełni adekwatne w stosunku do prezentowanego zagadnienia. Autor w sposób niezwykle dokładny analizuje przepływy pakietów IP oraz jednostek RLC PDU a także zajętości buforów w sieciach komórkowych wykorzystujących różne topologie:

- klasyczną z agregacją nośnych (Intra-site Carrier Aggregation, określaną również jako non-DC), w której wszystkie nośne pochodzą od jednej stacji bazowej,
- Dual Connectivity (Inter-site Carrier Aggregation), gdzie nośne pochodzą z odległych stacji bazowych,

pokazując, jaki wpływ ma rozdzielenie „głównego” strumienia IP na wiele strumieni podrzędnych w różnych warstwach protokołów radiowych (RLC lub PDCP) na działanie niższych warstw protokołów oraz informacje wymieniane pomiędzy nimi, dotyczące przede wszystkim działania algorytmów retransmisji (ARQ). Podaje następnie przykłady obrazujące błędy estymacji przepływności strumieni IP powstające przy wykorzystaniu standardowych metod pomiarowych w odniesieniu do systemów z topologią DC. Na tej podstawie proponuje nowe algorytmy wyznaczania czasów zajętości buforów oraz wolumenów danych, niezbędne do estymacji przepływności, mając na uwadze minimalizację ilości danych przekazywanych pomiędzy odległymi stacjami bazowymi, zaangażowanymi w realizację połączenia DC w celu zmniejszenia obciążenia interfejsu X2.

Również sposób zaprezentowania wyników badań uważam za poprawny. Większość z nich została przedstawiona w postaci czytelnych wykresów oraz tabel, dzięki czemu można szybko ocenić i porównać jakość i efekty działania proponowanych algorytmów. Należy podkreślić znaczną liczbę analizowanych scenariuszy testowych, obejmujących kombinacje różnych topologii sieci, czasów trwania szczelin, wielkości pakietów oraz rodzaju protokołów sieciowych. Testy zostały przeprowadzone dla różnej liczby transmitowanych strumieni UDP/TCP, od strumienia pojedynczego aż po jednoczesną transmisję 16 strumieni. Rozważono również sytuacje, w których niektóre z nich przesyłane są za pośrednictwem stacji bazowych realizujących jedynie agregację nośnych (od 2 do 5 nośnych składowych) a pozostałe pracują w topologii DC. Kolejną grupę stanowią testy przeprowadzone przy założeniu zmiennej w czasie jakości kanału radiowego, uwzględniając zarówno zaniki dużej skali, wynikającej z efektu tłumienia sygnału radiowego wraz z odległością, jak i zaniki średniej skali, związane z efektem cieniowania. Wykonano również testy pozwalające ocenić wpływ parametrów funkcji estymującej przepływność strumieni na dokładność dostarczanych

przez nią wyników. Równie ciekawe są wyniki testów przeprowadzonych przy różnych obciążeniach sieci testowej (10/50 użytkowników) oraz liczbie agregowanych nośnych dla przypadku agregacji pasma (2-4 nośnych).

Osiągnięte rezultaty zostały w wystarczającym stopniu omówione przez autora a ich interpretacja nie nastręcza czytelnikowi trudności.

Doktorant, zapewne jako pracownik Nokia Research Center w Gdańsku, bardzo poważnie podchodzi do problemu praktycznej implementacji zaproponowanych algorytmów w sieciach dostępowych systemów komórkowych, poświęcając mu treść jednego z rozdziałów. Pomimo, że metoda estymacji przepływności strumienia danych IP podlega standaryzacji w ramach 3GPP, analizowane w rozprawie algorytmy mogą być stosunkowo łatwo wykorzystane w praktyce, w szczególności na platformie O-RAN, bardzo obecnie promowanej wśród operatorów inwestujących w systemy 5G i rozbudowujących istniejące systemy 4G.

Do najważniejszych, oryginalnych osiągnięć autora, zaprezentowanych w recenzowanej rozprawie zaliczyć należy:

- Opracowanie skutecznej metody estymacji przepływności strumieni danych IP w sieciach dostępowych 4. i 5. generacji systemów komórkowych, które charakteryzują się znacząco lepszą dokładnością w przypadku stosowania topologii typu Dual Connectivity (DC).
- Przeprowadzenie niezwykle szczegółowej analizy przepływu pakietów IP oraz jednostek RLC PDU a także zajętości buforów w sieciach komórkowych wykorzystujących różne topologie.
- Analizę wpływu rozdzielenie „głównego” strumienia IP na wiele strumieni podrzędnych w różnych warstwach protokołów radiowych (RLC lub PDCP) na działanie niższych warstw protokołów oraz informacje wymieniane pomiędzy nimi, dotyczące przede wszystkim działania algorytmów retransmisji (ARQ).
- Uzyskanie obszernych wyników testów efektywności działania zaproponowanych metody estymacji przepływności strumieni danych IP w rzeczywistym środowisku sieci komórkowej, potwierdzających ich praktyczną przydatność w sieciach operatorów komórkowych.

Wymienione osiągnięcia pozwalają stwierdzić, że doktorant posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, osiągając przy tym zadowalające efekty. Wkład naukowy rozprawy jest niewątpliwy, a otrzymane wyniki mają dużą wartość poznawczą i znajdują praktyczne zastosowanie.

Mam również uwagi krytyczne, nie umniejszających jednak wysokiej oceny ogólnej. Jedną z nich odnosi się do zakresu przeprowadzonych testów systemu. W rozdziałach 1-4 autor rozprawy wielokrotnie wspomina, że badane przez niego metody estymacji przepływności strumieni danych IP znajdują zastosowanie w sieciach 5G NR, w których topologia Dual Connectivity jest rozwiązaniem standardowym, wynikającym z zaleceń 3GPP dla tej generacji systemów komórkowych. Jednakże wszystkie zaprezentowane testy zostały przeprowadzone z wykorzystaniem sieci LTE, dla których autor dokonał ich implementacji.

Należy mieć jednak na uwadze, że topologia DC nie jest rozwiązaniem standardowym dla sieci 4G, do których zalicza się system LTE. Doktorant wspomina zresztą w rozdziale 4.2, że niezbędna jest znaczna modyfikacja algorytmów sterowania przepływami (flow control), aby umożliwić realizację topologii podobnej do DC, wykorzystywanej w sieciach 5G.

Kolejna uwaga dotyczy tabeli prezentujących wyniki testów zamieszczonych w rozdziale 5.3.4, które nie są do końca czytelne, w szczególności brakuje wyjaśnienia znaczenia niektórych kolumn (np. NM VL FC) a wartości w nich pokazane są trudne w interpretacji. Były by one znacznie łatwiejsze do porównania pomiędzy różnymi rozważanymi przypadkami, gdyby podano je np. w kilobitach lub megabitach.

Pewien niedosyt powoduje też niewielka liczba publikacji, prezentujących osiągnięcia doktoranta na szerszym forum (2 publikacje, wyłącznie na forum krajowym). Biorąc pod uwagę mnogość wyników zaprezentowanych w rozprawie odnoszę wrażenie, iż autor nie do końca wykorzystał ich potencjał, szczególnie, że badane zagadnienia są bardzo aktualne i szeroko dyskutowane. Należy jednak zwrócić uwagę, iż doktorant uzyskał dwa patenty zagraniczne (Stany Zjednoczone) oraz złożył jedno zgłoszenie patentowe w oparciu o wyniki badań prezentowanych w rozprawie. Niewielką liczbę publikacji tłumaczyć może częściowo fakt, iż prowadzone badania były zapewne częściowo chronione tajemnicą handlową firmy Nokia. Jednak zdaniem recenzenta, nawet takie wymagania nie ograniczają szerszej publikacji osiągnięć doktoranta w postaci artykułów prezentujących przede wszystkim wyniki przeprowadzonych testów, bez wdawania się w szczegóły konstrukcyjne i implementacyjne opracowanych metod, wskazujące szerszemu gronu na możliwość poprawy jakości obsługi w istniejących oraz budowanych sieciach komórkowych nowych generacji.

Reasumując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Arkadiusza Zięby pt. „Evaluation method of IP Scheduled Throughput for Inter-eNB Carrier Aggregation and Cloud based environment” bez wątplenia spełnia warunki przewidziane w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

