

dr hab. inż. Marek Natkaniec, prof. AGH  
Instytut Telekomunikacji  
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Kraków, 25 styczeń 2026 r.

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: **Evaluation method of IP Scheduled Throughput for Inter-eNB Carrier Aggregation and Cloud based environment**

Autor rozprawy: **mgr inż. Arkadiusz Zięba**

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

Promotor pomocniczy: **dr inż. Martin Kollar**

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora? Czy tematyka rozprawy jest aktualna lub dostatecznie ważna?

Opiniowana rozprawa doktorska poświęcona jest zagadnieniom związanym z problemem estymacji przepływności IP w sieciach komórkowych Long Term Evolution (LTE) i 5G funkcjonujących w warunkach rozproszonych architektur sieciowych, w szczególności w środowiskach wykorzystujących mechanizmy Carrier Aggregation (CA) i Dual Connectivity (DC) pomiędzy różnymi węzłami eNB. Autor koncentruje się na podstawowej metryce Quality of Service (QoS) jaką jest przepływność, która jest również kluczowym wskaźnikiem wydajności sieci radiowych i której poprawny pomiar lub szacowanie ma zasadnicze znaczenie zarówno dla oceny jakości usług, jak i dla procesów optymalizacji, planowania i zarządzania siecią komórkową. Zagadnienie to należy uznać za aktualne i istotne z punktu widzenia współczesnej telekomunikacji, ponieważ rosnący stopień rozproszenia architektury sieciowej powoduje, że klasyczne metody pomiaru przepływności, opracowane dla architektur scentralizowanych, przestają być adekwatne i prowadzą do wyników obciążonych istotnym błędem. W rozdziale 1.2 Autor sformułował sześć tez badawczych, które brzmią (zgodnie z językiem pracy):



RPW/3641/2026 N  
Data: 2026-01-30

T1. The development of a novel method enables more precise throughput estimation in LTE/5G cellular networks compared to existing methods described in technical documentation and recommended for use in these networks.

Additionally, in the research part of this work, the validity of above hypothesis will be demonstrated by designing and implementing a novel algorithm, characterized by the following properties:

T2. The innovative method demonstrates improved accuracy in estimating the amount of data volume and transmission duration from the base station's perspective.

T3. The presented method effectively estimates IP scheduled throughput for conventional connection types, including single cell or intra-site CA connections without DC, or in mixed network environments with DC and non-DC configurations under a single user connection type, regardless of transmission duration for transmission types meeting 3GPP requirements.

T4. The novel method accurately estimates IP scheduled throughput under challenging radio channel quality conditions, regardless of the cell participating in specific user connection which experiences diminished signal quality.

T5. The novel method yields accurate estimations of IP scheduled throughput for varying quantity of SCells from different SeNBs.

T6. The enhanced method effectively estimates IP scheduled throughput for varying number of users under a specific MeNB cell.

Zagadnienie naukowe zostało przez autora sformułowane w sposób poprawny i logicznie uzasadniony. Wprawdzie w początkowych rozdziałach rozprawy Autor sugeruje, że przedmiotem pracy jest ogólny problem poprawnego pomiaru przepływności IP w architekturach rozproszonych, co mogłoby implikować bardzo szeroki zakres rozważań, obejmujący różne modele ruchu oraz relacje pomiędzy przepływnością, a jakością postrzeganą przez użytkownika Quality of Experience (QoE). W dalszej części pracy okazuje się jednak, że Autor zawęży swoje badania niemal wyłącznie do jednego, ściśle zdefiniowanego wskaźnika Key Performance Indicator (KPI) oraz do jego konkretnej implementacji. Teza rozprawy, zakładająca możliwość opracowania nowej metody estymacji przepływności lepiej dostosowanej do architektur rozproszonych niż metoda standardowa (oparta na standardach 3GPP), została sformułowana poprawnie i pozostaje w logicznym związku z przedstawionym zagadnieniem naukowym. Autor wskazuje, że proponowana metoda pozwala na uzyskanie wyników bardziej reprezentatywnych dla rzeczywistej przepływności odbieranej przez użytkownika końcowego, bez konieczności pełnej synchronizacji pomiędzy węzłami sieci. Szkoda jednak, że w postawionej tezie T1 od razu nie określono, na której warstwie będzie estymowana ta przepływność.

2. Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Rozprawa ma charakter wyraźnie technologiczny i doświadczalny. Autor skupia się na rozwiązaniu konkretnego problemu inżynierskiego, wykorzystując analizę standardów, projektowanie algorytmu, jego implementację w środowisku systemowym oraz weryfikację eksperymentalną. Elementy teoretyczne pełnią w pracy rolę wspierającą i są podporządkowane

celom praktycznym. W rezultacie rozprawa nie ma charakteru stricte teoretycznego, lecz stanowi przykład dojrzałej pracy badawczej o silnym nastawieniu wdrożeniowym, co należy uznać za zgodne z profilem dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja.

3. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadczącej o dostatecznej wiedzy Autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

W recenzowanej rozprawie doktorskiej obecny stan wiedzy tzw. *state-of-the-art* w dziedzinie pomiaru przepływności IP w sieciach komórkowych LTE i 5G stanowi częściową zawartość rozdziału drugiego. Warto jednak zaznaczyć, że Autor odnosi się do zebranej literatury również w rozdziałach pierwszym i trzecim. W spisie literatury Autor przytacza 63 pozycje, w tym pięć prac współautorskich. Zdecydowana większość cytowanych w spisie literatury pozycji jest anglojęzyczna i obejmuje standardy 3GPP, patenty a także znane i cenione konferencje międzynarodowe, czasopisma z tzw. listy filadelfijskiej i książki wydane przez uznane wydawnictwa międzynarodowe. W spisie znalazły się również pozycje opisujące stronę internetową, raport i czasopismo o zasięgu krajowym. W rozprawie przeprowadzono analizę źródeł w sposób zasadniczo poprawny i adekwatny do charakteru podejmowanego zagadnienia, przy czym widoczna jest wyraźna dominacja perspektywy standardów technicznych nad analizą literatury stricte naukowej. Autor wykazuje bardzo dobrą orientację w dokumentach normalizacyjnych 3GPP dotyczących systemów LTE, LTE-Advanced oraz 5G, w szczególności w zakresie definicji wskaźników wydajności, architektur sieciowych oraz mechanizmów DC i CA. Znajomość tych dokumentów świadczy o wysokim poziomie kompetencji technicznych Autora oraz o jego doświadczeniu w pracy z rzeczywistymi systemami telekomunikacyjnymi. Analiza standardów nie ma charakteru jedynie opisowego, lecz obejmuje także wskazanie ich założeń projektowych oraz ograniczeń wynikających z przyjętej architektury, co stanowi istotny element uzasadnienia dalszych badań. Autor poprawnie identyfikuje dominujące nurty badawcze, w których nacisk kładziony jest przede wszystkim na zwiększanie przepływności poprzez nowe techniki transmisyjne, optymalizację harmonogramowania czy zarządzanie zasobami radiowymi, a nie na sam problem jej pomiaru w architekturach rozproszonych. W tym kontekście trafnie wskazuje, że zagadnienie estymacji przepływności IP w środowiskach DC i Cloud-RAN pozostaje w literaturze naukowej zagadnieniem marginalnym. Z drugiej strony należy zauważyć, że analiza literatury naukowej ma w rozprawie charakter dość zawężony i w niewielkim stopniu wychodzi poza bezpośredni kontekst standardów i architektur 3GPP. Brakuje odniesień do bardziej ogólnych prac z zakresu teorii pomiarów, estymacji w systemach dynamicznych czy modelowania wydajności systemów rozproszonych, które mogłyby wzmocnić teoretyczne podstawy rozważań Autora. W rezultacie przegląd literatury, choć poprawny i funkcjonalny z punktu widzenia celów pracy, nie w pełni wykorzystuje potencjał istniejącego dorobku naukowego w szerszym ujęciu metodologicznym. Szkoda również, że cytowane prace są raczej starsze – najnowsze cytowane prace są z roku 2023. Wnioski z przeglądu źródeł zostały sformułowane w sposób jasny i logicznie spójny. Autor jednoznacznie wskazuje na lukę pomiędzy obowiązującymi metodami pomiaru przepływności IP, a wymaganiami wynikającymi z rozproszonych architektur sieciowych, co stanowi bezpośrednie uzasadnienie podjęcia własnych badań. Pomimo tych zastrzeżeń analiza źródeł świadczy o dostatecznej wiedzy autora w zakresie podejmowanej problematyki i stanowi solidną podstawę dla dalszych rozważań zawartych w rozprawie.

4. Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Autor rozprawy w sposób konsekwentny podejmuje próbę rozwiązania postawionego problemu badawczego, jakim jest opracowanie metody estymacji przepływności IP lepiej przystosowanej do funkcjonowania w rozproszonych architekturach sieci LTE i 5G niż rozwiązania zdefiniowane w standardach 3GPP. W tym celu posługiwał się wyłącznie badaniami eksperymentalnymi z użyciem rzeczywistej sieci testowej, dowodząc zarówno prawdziwości zredagowanych w rozprawie tez, jak i dokonując analizy komparatywnej. Przedstawione w pracy działania badawcze są logicznie uporządkowane i prowadzą od identyfikacji ograniczeń metody referencyjnej, poprzez zaproponowanie własnego podejścia, aż do jego implementacji w oprogramowaniu i weryfikacji w środowisku doświadczalnym. Można więc uznać, że autor rozwiązał zasadnicze zagadnienia sformułowane we wstępnej części rozprawy, osiągając cele, które sam sobie postawił. Zastosowana metoda badawcza ma charakter inżyniersko-doświadczalny i jest adekwatna do praktycznego charakteru problemu. Autor opiera swoje rozważania na analizie działania istniejących mechanizmów estymacji przepływności, następnie modyfikuje sposób wyznaczania wybranych składowych obliczeniowych, wprowadzając pojęcie oczekiwanej przepływności IP, oraz implementuje zaproponowany algorytm w środowisku systemowym umożliwiającym jego testowanie w rzeczywistych lub zbliżonych do rzeczywistych warunkach sieciowych. Takie podejście odpowiada dobrym praktykom badań stosowanych w telekomunikacji, gdzie weryfikacja eksperymentalna ma kluczowe znaczenie dla oceny przydatności proponowanych rozwiązań. Warto również docenić, że zaproponowana metoda wyznaczania przepływności została zaimplementowana w oprogramowaniu urządzeń firmy Nokia. Jednocześnie należy zauważyć, że przyjęta metodyka w ograniczonym stopniu wykorzystuje narzędzia formalnej analizy. Autor nie podejmuje próby matematycznego opisu własności zaproponowanej metody, takich jak jej dokładność, stabilność czy odporność na zakłócenia. Mimo tych ograniczeń należy podkreślić, że zaproponowana metoda została zweryfikowana w sposób spójny z założonym celem pracy i wykazuje przewagę nad metodą standardową w większości analizowanych przypadków. Autor wykazał się umiejętnością doboru narzędzi badawczych odpowiednich do rozwiązywanego problemu oraz zdolnością do praktycznego zastosowania wiedzy teoretycznej. Przyjęte założenia są w większości racjonalne i zgodne z realiami funkcjonowania współczesnych sieci komórkowych, choć ich zakres uogólnienia pozostaje ograniczony i mógłby zostać lepiej uzasadniony poprzez pogłębioną analizę teoretyczną. Metodom zaprezentowanym w rozprawie odpowiadają trzy patenty i dwie publikacje:

- Kollar M., Tomala M., Zięba A.: Evaluation of DL IP scheduled throughput for inter eNB carrier aggregation, Patent Application WO2019192716A1, October 10, 2019.
- Kollar M., Tomala M., Zięba A.: Evaluation of DL IP scheduled throughput for inter eNB carrier aggregation, U.S. Patent 11523407B2, December 12, 2022.
- Kollar M., Tomala M., Zięba A.: Evaluation of DL IP scheduled throughput for inter eNB carrier aggregation, U.S. Patent 11943799B2, December 12, 2022.
- Zięba A., Sadowski J., Kollar M., Tatarczyk K.: Measurement Accuracy of IP Scheduled Throughput in LTE Network With Dual Connectivity, Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, 4/2023, str. 260-263, doi: 10.15199/59.2023.4.57.

- Zięba A., Kollar M., Tatarczyk K., Sadowski J.: Practical Approach to IP Scheduled Throughput Measurements in Dual Connectivity Systems, Intl Journal of Electronics and Telecommunications, 2023, vol. 69, no. 4, pp. 645-654, doi: 10.24425/ijet.2023.146518.

5. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Oryginalność rozprawy doktorskiej przejawia się przede wszystkim w zaproponowaniu autorskiej metody estymacji przepływności IP, ukierunkowanej na specyficzne warunki funkcjonowania rozproszonych architektur sieci LTE i 5G, w których klasyczne mechanizmy pomiarowe oparte na założeniu centralizacji i jednoznacznej kontroli czasu transmisji przestają być wystarczające. Autor samodzielnie identyfikuje istotne ograniczenia obowiązujących w standardach 3GPP metod wyznaczania wskaźników przepływności, w szczególności wynikające z braku pełnej synchronizacji pomiędzy węzłami sieci oraz z rozdzielania funkcji sterujących i użytkowych pomiędzy różne elementy architektury. Już samo to rozpoznanie problemu, poparte analizą mechanizmów standardowych, stanowi wartościowy wkład poznawczy, gdyż zagadnienie to rzadko bywa przedmiotem pogłębionych analiz w literaturze naukowej. Samodzielny i oryginalny dorobek Autora polega głównie na opracowaniu i praktycznej weryfikacji zmodyfikowanego sposobu estymacji przepływności IP (IP Scheduled Throughput), opartego na koncepcji oczekiwanej przepływności oraz innym ujęciu komponentu czasowego transmisji. Proponowane rozwiązanie nie jest prostą modyfikacją parametrów istniejącego algorytmu, lecz wynika z odmiennego sposobu interpretacji zdarzeń transmisyjnych w środowisku rozproszonym. Warto docenić zastosowanie innowacyjnej metody kontroli przepływu, filtra Infinite Impulse Response (IIR) ze stałą służącą do oszacowania wartości przepustowości SCell dla konkretnego użytkownika, filtra wykładniczej średniej ruchomej, a także parametru, który z góry zakłada jakość kanału radiowego i przepustowość SeNB podczas fazy inicjalizacji konfiguracji CA. Autor wykazuje się przy tym zdolnością do samodzielnego projektowania algorytmów oraz do ich implementacji w złożonym środowisku systemowym, co stanowi istotny element jego dorobku naukowo-technicznego. Pozycję rozprawy na tle stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową należy ocenić pozytywnie. W literaturze dominują prace koncentrujące się na zwiększaniu przepływności poprzez optymalizację warstwy fizycznej i MAC, natomiast problem jej dokładnego pomiaru w architekturach rozproszonych bywa traktowany marginalnie. W tym sensie rozprawa wypełnia zauważalną lukę badawczą, przenosząc punkt ciężkości z maksymalizacji przepływności na jej wiarygodną estymację w realnych warunkach sieciowych. Jednocześnie należy zaznaczyć, że oryginalność pracy ma charakter głównie aplikacyjny, a nie fundamentalny. Autor nie formułuje nowych teorii ani ogólnych modeli matematycznych, lecz proponuje rozwiązanie dostosowane do określonej klasy systemów i scenariuszy. Pomimo tego ograniczenia rozprawa prezentuje wyraźną wartość dodaną w stosunku do istniejącego dorobku, szczególnie z perspektywy inżynierii telekomunikacyjnej. Zaproponowana metoda może być postrzegana jako istotne rozszerzenie praktyk pomiarowych stosowanych obecnie w sieciach LTE i 5G, a jej oryginalność polega na umiejętnym połączeniu wiedzy standardowej z autorską interpretacją problemu estymacji. Całokształt rozprawy świadczy o dużej wiedzy Autora w zakresie poruszanej tematyki. Szkoda tylko, że większość swoich prac naukowych Autor opublikował wyłącznie w dwóch

czasopismach: jednym o zasięgu krajowym i jednym o zasięgu międzynarodowym. Docenić natomiast należy uzyskanie aż trzech patentów o zasięgu międzynarodowym.

6. Czy Autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Praca została napisana w języku angielskim w sposób przejrzysty, uporządkowany i logiczny, przy czym styl prezentacji jest wyraźnie podporządkowany inżynierskiemu charakterowi pracy. Struktura rozprawy jest przejrzysta, a kolejne rozdziały w sposób naturalny prowadzą czytelnika od analizy problemu, poprzez opis zaproponowanej metody, aż do prezentacji wyników eksperymentalnych. Autor konsekwentnie zachowuje spójność terminologiczną, z małymi wyjątkami do których odnoszę się w kolejnym punkcie recenzji oraz jasno definiuje pojęcia techniczne, co ułatwia śledzenie toku rozumowania, zwłaszcza czytelnikom posiadającym przygotowanie w zakresie telekomunikacji. Prezentacja wyników opiera się na licznych wykresach, tabelach oraz opisach scenariuszy testowych, które w większości przypadków są czytelne i adekwatnie opisane. Autor potrafi w sposób klarowny wskazać najważniejsze obserwacje wynikające z przeprowadzonych eksperymentów i zestawić je z wynikami uzyskiwanymi przy zastosowaniu metody standardowej. W tym zakresie praca spełnia podstawowe wymogi poprawnej prezentacji wyników naukowych, a argumentacja oparta na danych eksperymentalnych jest zrozumiała i logicznie spójna. Szkoda jednak, że w niektórych opisach brakuje głębszego spojrzenia na efekt działania poszczególnych mechanizmów i ich pogłębionej interpretacji, a same wnioski ograniczają się jedynie do relacjonowania wyników uzyskanych w tabelach. W niektórych fragmentach rozprawy czytelnik otrzymuje szczegółowy opis zachowania wskaźników pomiarowych, lecz bez jednoznacznego wskazania, jakie wnioski o charakterze bardziej ogólnym należy z tych obserwacji wyciągnąć. Autor niekiedy powtarza te same treści w różnych częściach rozprawy, zwłaszcza przy opisie scenariuszy testowych oraz przypomnianiu założeń metody, co prowadzi do pewnej rozwlekłości tekstu. Z drugiej strony nadmiarowe objaśnienia mogą być postrzegane jako próba zapewnienia pełnej przejrzystości wyводу, szczególnie dla czytelników mniej zaznajomionych z praktycznymi aspektami działania sieci LTE i 5G. Poprawność redakcyjna rozprawy jest zasadniczo dobra. Język pracy jest formalny i adekwatny do stylu naukowego, a błędy językowe i stylistyczne występują sporadycznie i nie wpływają istotnie na zrozumiałość tekstu (kilka z nich zostało przytoczonych w kolejnym punkcie recenzji). Całościowo można stwierdzić, że autor potrafi w sposób poprawny i przekonujący zaprezentować uzyskane wyniki, choć ich siła oddziaływania mogłaby zostać zwiększona poprzez bardziej pogłębioną interpretację rezultatów w kontekście istniejącej wiedzy naukowej.

7. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Recenzowana rozprawa, nie jest wolna od drobnych niedociągnięć bądź nieścisłości. W pracy nie zauważono jednak poważniejszych błędów merytorycznych oraz metodologicznych. Szczegółowa analiza pracy umożliwia jednak sformułowanie szeregu uwag krytycznych. Należy jednak nadmienić, że są to głównie błędy o charakterze organizacyjno-redakcyjnym oraz drobne aczkolwiek liczne uwagi merytoryczne. Wszystkie uwagi zostały podzielone na trzy kategorie: uwagi dyskusyjne, mniej istotne uwagi krytyczne oraz uwagi redakcyjne.

### Uwagi dyskusyjne:

- a) Str. 42 Autor pisze, że ważne jest zrozumienie zgodności między obliczoną przepływnością z użyciem nowej metody, a postrzeganą przez użytkownika jakością Quality of Experience (QoE). W jakie sposób rozumie autor QoE? Nie jest to bowiem przepływność mierzona dla terminala użytkownika z punktu widzenia jego aplikacji. Do terminu QoE Autor odwołuje się również w innych częściach pracy np. na str. 69.
- b) Warto byłoby na początku pracy zdefiniować wszystkie używane metryki np. cell throughput (str. 42), czy też application layer throughput (również str. 42), a także UE throughput (str. 43), gdyż naprzemienne ich używanie wprowadza niepotrzebny chaos i niezrozumienie. Nie wiadomo np. czy UE throughput jest mierzone na poziomie warstwy transportowej (iperf), czy też odnosi się do pomiaru przepływności terminala użytkownika z punktu widzenia warstwy aplikacji?
- c) W pracy zaproponowano użycie stosunkowo prostego filtra Infinite Impulse Response (IIR) do uśredniania w czasie oczekiwanej przepustowości eTh, łagodząc w ten sposób wpływ krótkotrwałych wahań zakłóceń o dużej intensywności. Czy rozważano również użycie innych filtrów np. Kalmana, który jest bardziej złożony i lepiej radzi sobie z szybko zmieniającym się kanałem?
- d) Str. 57 Czy TB size nie powinien być określony na wykresach w kbit zamiast w kbit/s (np. str. 139, Rys. 5.37 i Rys. 5.38)?
- e) Str. 63 Z treści pracy nie wynika dlaczego przyjęto założenie, że opóźnienie (delay) na interfejsie X2 jest równe połowie czasu Round-Trip Time (RTT). Czy jest to realistyczne założenie w przypadku analizowanego systemu?
- f) Jakie jest uzasadnienie wyboru narzędzie iperf do generowania ruchu zamiast np. mgen, w którym można swobodnie definiować charakterystykę generowanego ruchu, złożonych scenariuszy działania aplikacji, opóźnienia transmisji, klas ruchu itp.?
- g) Str. 79 Aplikacja iperf standardowo dostarcza takie metryki jak: througput, jitter i loss. W jaki sposób uzyskano metrykę latency jako metrykę QoS?
- h) Str. 75 Autor pisze, że Qualcomm eXtensible Diagnostic Monitor (QXDM) dostarcza pomiarów przepływności UE na poziomie warstwy aplikacji, co potwierdza Tabela 5.3, jednak na Rys. 5.2 obserwujemy wyniki przepustowości UE mierzone z użyciem QXDM na warstwie Packet Data Convergence Protocol (PDCP). Czy narzędzie firmy Qualcomm podaje przepustowość na różnych warstwach?
- i) Z czego wynika ustawienie TCP maximum segment size w narzędziu iperf na wartość jedynie 1400B?
- j) Str. 82 Dlaczego Autor założył czas realizacji pomiarów wyłącznie jako 5 sekund i 10 sekund? Czy to nie zbyt krótka wartość, zwłaszcza jeżeli bada się wydajność korzystając z protokołu TCP? Jeżeli jednak należało porównać błędy obu metod, to może warto było rozpocząć czas pomiaru od jeszcze mniejszej wartości np. 1s i zwiększać go o 1s, aż do osiągnięcia wartości 10s. Można by wtedy dokonać oceny liniowości zmian błędów z rosnącym czasem transmisji.
- k) Str. 87 Z tekstu pracy nie wynika ile razy powtarzane były pomiary zaprezentowane w Tabeli 5.4. Dlaczego w przypadku transmisji pliku o wielkości 1MB oraz konfiguracji Intra-site CA błąd pomiaru był większy dla nowej metody? Ta sama sytuacja występuje np. podczas transmisji pliku 200kB i 500kB oraz konfiguracji Inter-site CA. Warto byłoby wytłumaczyć uzyskane wyniki poprzez interpretację działania poszczególnych mechanizmów. Ta sama uwaga dotyczy wyników zaprezentowanych w Tabeli 5.5.

- l) Str. 101 Autor pisze, że ze względu na nieracjonalne wartości prezentowane przez aplikację iperf na UE, nie można było uzyskać niektórych wyników i oznaczono je jako niemające zastosowania (N/A). Czy Autor próbował zgłębić ten problem? Może należało użyć innej aplikacji do generowania ruchu?
- m) Str. 110 Z czego wynika tak duża różnica między względnym błędem pomiaru przepustowości nowej metody mierzonej na różnych warstwach np. Rys 5.24 i Rys. 5.25?
- n) Str. 111 Iperf przedstawia wyniki uzyskane powyżej TCP/UDP, ale poniżej warstwy aplikacji (brak np. http, RTP itp.) stąd używanie pojęcia "application layer throughput" znowu jest mocno mylące. Bardziej poprawne byłoby użycie "UDP/TCP layer throughput" lub ew. "UDP/TCP application layer throughput". Czy wartość ruchu 975 Mbps na poziomie warstwy transportowej, a tym bardziej 1000 Mbps ustawionej jako 'Iperf set TP' nie przekracza 1 Gbps dla warstwy PHY sieci Ethernet używanej do podłączenia serwera iperf? Czy nie stanowiło to jakiegoś ograniczenia w p?
- o) Str. 124 Czy pomiary (np. w Tabeli 5.28) próbowano wielokrotnie powtarzać, aby uzyskać odpowiednią wiarygodność uzyskanych wyników? Trochę dziwna jest zmienność wyników dla różnych wielkości plików oraz tłumienia 30 dB.

#### Mniej istotne uwagi krytyczne:

- a) Str. 42 Nie jest jasne co Autor rozumie pod pojęciem "download/upload rates". Czy jest to metryka throughput z punktu widzenia aplikacji użytkownika, a może wartość na warstwie PHY związana z użyciem konkretnego MCS'a ustalonego między terminalem użytkownika i MeNB/SeNB?
- b) Str. 45 Oznaczenia na Rysunku 4.1 nie są zgodne z opisem dotyczącym połączenia poszczególnych użytkowników, np. pierwszy użytkownik jest połączony do eNB1, który pracuje jako MeNB, tymczasem na rysunku MeNB jest przypisany do eNB2.
- c) Str. 49 Autor pisze, że wartość  $eTh$  jest przesyłana z węzła nadrzędnego (master node) do podrzędnego (secondary node) w określonym czasie DDDSs lub TTI. Czy nie powinno być odwrotnie?
- d) Str. 81 Jaka jest wiarygodność pomiarów pokazana na Rys. 5.2? Czy pomiary zostały wielokrotnie powtórzone?
- e) Str. 82 Data rate to szybkość przesyłu danych w bitach na sekundę, zwykle podawana na warstwie PHY, a nie wartość otrzymywana przez użytkownika, dlatego niejasne są pojęcia typu "end-user's perceived data rate".
- f) Warto ujednoczyć pisownię tych samych jednostek np. kbits, kbps.
- g) Str 111 Sformułowanie "UDP transmission rates" jest niejednoznaczne, gdyż bardziej określa szybkość transmisji na warstwie PHY podczas generowania danych na poziomie warstwy transportowej. Jeżeli chodzi o określenie ruchu UDP generowanego przez iperf to lepiej było użyć sformułowania "UDP offered load".

#### Uwagi redakcyjne:

- a) Str. 18 as shown on Figure 2.2. -> as shown in Figure 2.2.
- b) Str. 33 3.2. IP Scheduled Throughput Measurement Challenges in DC Systems -> 3.2. IP Scheduled Throughput Measurement Challenges in DC Systems
- c) Str. 34 To the authors' knowledge, -> To the author's knowledge,
- d) Str. 41 (including IP header).. -> (including IP header).
- e) Str. 58 shown on Figure 4.7 -> shown in Figure 4.7

- f) Str. 129 transmission speed -> transmission rate
- g) Str. 141 Brak opisu pierwszej kolumny w tabeli 5.36

Pomimo niewątpliwych walorów aplikacyjnych oraz poprawnej realizacji założonych celów badawczych, rozprawa doktorska nie jest wolna od pewnych słabości i ograniczeń. Do najistotniejszych mankamentów pracy należy zaliczyć ograniczony poziom formalizacji rozważań oraz brak pogłębionej analizy teoretycznej zaproponowanej metody. Autor koncentruje się przede wszystkim na aspekcie implementacyjnym i empirycznym, co jest zrozumiałe w kontekście inżynierskiego charakteru pracy, jednak szkoda, że Autor nie podjął próby uogólnienia wyników oraz ich osadzenia w szerszych ramach metodologicznych. Kolejną istotną słabością rozprawy jest silne uzależnienie wyników badań od konkretnego środowiska testowego oraz określonych scenariuszy eksperymentalnych. Choć autor przeprowadza liczne testy i analizuje różne konfiguracje sieciowe, zakres tych badań pozostaje ograniczony do wybranej klasy architektur i implementacji. W pracy brakuje wyraźnej refleksji nad tym, w jakim stopniu uzyskane rezultaty można uogólnić na inne systemy, inne rozwiązania sprzętowe lub odmienne modele ruchu sieciowego. Autor nie analizuje również innych scenariuszy granicznych ani przypadków nietypowych, w których zaproponowana metoda mogłaby prowadzić do błędnych lub trudnych do interpretacji wyników. Pewne zastrzeżenia budzi także sposób sformułowania i weryfikacji przyjętych założeń badawczych. Autor często opiera się na intuicyjnym uzasadnieniu przyjętych rozwiązań, wskazując na ich zgodność z obserwacjami empirycznymi lub praktyką przemysłową, jednak rzadko poddaje te założenia krytycznej analizie. W szczególności brakuje rozważań dotyczących wrażliwości zaproponowanej metody na zmiany parametrów wejściowych, takich jak charakterystyka ruchu, stopień asymetrii połączeń czy większa zmienność warunków radiowych. Tego typu analiza pozwoliłaby lepiej ocenić zakres poprawnego działania metody oraz jej potencjalne ograniczenia.

Istotnym mankamentem rozprawy jest również, wspomniany wcześniej, stosunkowo wąski przegląd literatury naukowej w zakresie metod pomiaru i estymacji wydajności systemów telekomunikacyjnych. Autor koncentruje się głównie na dokumentach standaryzacyjnych oraz publikacjach bezpośrednio związanych z architekturami LTE i 5G, pomijając bogaty dorobek literatury z zakresu teorii estymacji, modelowania systemów dynamicznych czy analizy wydajności systemów rozproszonych. W efekcie praca sprawia momentami wrażenie silnie osadzonej w kontekście jednej klasy rozwiązań technologicznych, bez szerszego odniesienia do uniwersalnych metod i narzędzi badawczych stosowanych w innych obszarach informatyki technicznej. Do słabości rozprawy należy zaliczyć także sposób prezentacji wyników, który choć poprawny pod względem technicznym, bywa nadmiernie opisowy i mało syntetyczny. Autor często koncentruje się na szczegółowym relacjonowaniu przebiegu eksperymentów i zachowania poszczególnych wskaźników, zamiast formułować bardziej ogólne wnioski o charakterze naukowym. Brakuje wyraźnego oddzielenia obserwacji od interpretacji, co utrudnia czytelnikowi ocenę, które elementy wyników stanowią bezpośredni rezultat badań, a które są już autorską interpretacją autora.

Podsumowując, główne wady rozprawy wynikają z jej silnie aplikacyjnego charakteru, który został osiągnięty kosztem pogłębionej refleksji teoretycznej i metodologicznej. Praca dostarcza wartościowych rozwiązań praktycznych, lecz w mniejszym stopniu przyczynia się do rozwoju ogólnej wiedzy naukowej w zakresie metod estymacji wydajności systemów telekomunikacyjnych. Wskazane słabości nie przekreślają wartości rozprawy jako całości, jednak wyznaczają obszary, które mogłyby zostać istotnie rozwinięte w dalszych badaniach autora.

8. Jaka jest przydatność rozprawy dla dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja?

Pomimo kilku zastrzeżeń rozprawa posiada istotną wartość dla dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja. Może stanowić użyteczne źródło wiedzy dla inżynierów zajmujących się pomiarami wydajności w sieciach LTE i 5G oraz osób opracowujących nowe aplikacje multimedialne, spełniające odpowiednie wymagania QoE, gdzie ważne jest dokładne szacowanie przepływności po stronie użytkownika. Może również stanowić punkt wyjścia do dalszych, bardziej pogłębionych badań. Wszystkie zaproponowane przez Autora rozwiązania zostały z sukcesem zaimplementowane i przetestowane w przygotowanej sieci testowej. Przedstawione rozważania teoretyczne, jak również praktyczna implementacja oraz analiza doświadczalna opracowanych protokołów świadczą o wysokiej użyteczności wykonanej pracy. Trudno nie zgodzić się ze stwierdzeniem, że niniejsza rozprawa wnosi znaczący wkład do aktualnego stanu wiedzy w zakresie poprawnego szacowania przepływności IP w sieciach komórkowych LTE i 5G funkcjonujących w warunkach rozproszonych architektur sieciowych, w szczególności w środowiskach wykorzystujących mechanizmy DC i CA pomiędzy różnymi węzłami eNB.

9. Podsumowanie. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a. niespełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy,
- b. wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,
- c. zadowolająco spełniająca wymagania,
- d. spełniająca wymagania poza poziom przeciętny (z wyraźnym nadmiarem),
- e. wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie.

Wniosek końcowy

Reasumując, stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska spełnia warunki określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 z późn. zm.) i wnioskuję o dopuszczenie Autora do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora.

*Marek Natkaniec*