

Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych

DZIEKAN I RADA WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMATYCZNYCH
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

zawiadamiają o

PUBLICZNEJ OBRONIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Remigiusza Prokopiaka

która odbędzie się w trybie zdalnym w dniu 9 listopada 2020 r. o godzinie 9.00

Tytuł rozprawy doktorskiej: „Application-aware concurrent multipath traffic steering”

promotor: prof. dr hab. inż. Mieczysław Muraszekiewicz Wydział Elektroniki i
Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej

recenzenci: dr hab. inż. Dariusz Mrozek, prof. uczelni Wydział Automatyki, Elektroniki
i Informatyki Politechniki Śląskiej

prof. dr hab. inż. Józef Woźniak Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i
Informatyki Politechniki Gdańskiej

Na stronie internetowej wydziału www.elka.pw.edu.pl/Wydzial/Rada-Wydzialu/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje znajdują się streszczenie rozprawy oraz recenzje, jak również dostęp do tekstu rozprawy umieszczonej w Bazie Wiedzy Politechniki Warszawskiej.

Sposób uczestniczenia w publicznej obronie:

https://teams.microsoft.com/l/meetup-join/19%3ameeting_OWfmOWJjZGQtMDg1OC00N2M3LTlhNjgtODM2YzFhNmE4NDNh%40thread.v2/0?context=%7b%22Tid%22%3a%223b50229c-cd78-4588-9bcf-97b7629e2f0f%22%2c%22Oid%22%3a%22cafbddf-b922-42cc-bcda-6f80c1b14aeb%22%7d

Dziekan



prof. dr hab. inż. Michał Malinowski

Streszczenie Pracy Doktorskiej

Autor: Remigiusz Prokopiak

Promotor: profesor Mieczysław Muraszekiewicz

Application-aware concurrent multipath traffic steering

Reagująca na potrzeby aplikacji, jednoczesna transmisja wielościeżkowa.

W dzisiejszych sieciach mobilnych, serwisy oparte o transmisję danych stają się coraz bardziej popularne. Aktualnie, pojemność sieci mobilnych najbardziej wykorzystują usługi transmisji treści video. Stanowią one 60% całego ruchu sieciowego [1]. Aplikacje wykorzystywane do transmisji treści video zazwyczaj potrafią się zaadaptować do dostępnej jakości połączenia (Quality of Service – QoS) oferowanego przez sieć – czasami z postrzeganą, przez użytkownika, degradacją jakości. Warto zauważyć, że ponad 60% ruchu generowanego przez użytkowników czterech największych Operatorów Sieci Mobilnych w Stanach Zjednoczonych obsługiwana jest przez sieci WiFi [2]. Oznacza to, że użytkownicy sieci mobilnej albo świadomie przełączają się na połączenie WiFi, albo zostają przełączeni automatycznie przez Operatora. Zmiana technologii dostępu radiowego ma na celu albo poprawę postrzeganej przez użytkownika jakości połączenia, albo odciążenie, relatywnie drogiej, sieci mobilnej. Inwestycje w pojemność sieci mobilnej obarczone są wieloma ograniczeniami [6] – często zdarza się, że użytkowanie sieci WiFi jest rozwiązaniem najbardziej optymalnym pod względem zarówno kosztów Operatora jak i postrzeganej jakości. Operacja przełączania pomiędzy siecią Operatora i siecią WiFi jest relatywnie łatwa, ponieważ aktualnie używane telefony komórkowe dysponują wieloma interfejsami radiowymi (n.p. LTE, WiFi). Pomimo tego, dotychczas, jednoczesne użytkowanie wielu dostępów radiowych nie jest praktykowane – transmisja zachodzi tylko na jednym z wielu możliwych interfejsów.

Dysponujemy wieloma rozwiązaniami oferujących Jednoczesną Transmisję Wielościeżkową. Najbardziej znane to Multipath TCP (MPTCP)[4] oraz Concurrent Multipath Transfer for Stream Control Transmission Protocol (CMT-SCTP) [5]. Oba rozwiązania adresują trzy najważniejsze zadania postawione przed Jednoczesną Transmisją Wielościeżkową – mianowicie a) dostarczają zawsze lepszą jakość niż transmisja jednościeżkowa, b) nie wpływają negatywnie na transmisję jednościeżkową korzystającą z tych samych zasobów sieciowych, c) dystrybuują natłok pomiędzy dostępne ścieżki. Żadne z dotychczasowych rozwiązań nie adresuje chwilowych potrzeb aplikacji (przepływność, opóźnienie) poprzez odpowiednią alokację przesyłanych danych na, posiadające różne charakterystyki, używane ścieżki.

Nasze rozwiązanie Reagującej na Potrzeby Aplikacji Jednoczesnej Transmisji Wielościeżkowej wykorzystuje dotychczas opublikowane mechanizmy używane na potrzeby unikania i kontroli natłoku dla transmisji wielościeżkowej. Dzięki temu osiąga trzy wymienione powyżej zadania postawione przed transmisją wielościeżkową. Dodatkowo, nasze rozwiązanie, bierze pod uwagę chwilowe potrzeby aplikacji, aby lepiej wykorzystać różne charakterystyki używanych ścieżek. Ten element umożliwia poprawę jakości użytkowania aplikacji.

Nasze rozwiązanie jest agnostyczne pod względem wykorzystywanych sieci i protokołów sieciowych przez nie używanych – wymaga jedynie zainstalowania agentów na obu końcach połączenia.

W pierwszym kroku naszej pracy przedstawiamy motywację pracy oraz definiujemy cele jakie nasze rozwiązanie ma spełnić. W drugim kroku przedstawiamy podstawowe pojęcia oraz stan aktualnej wiedzy z obszaru pracy.

W trzecim kroku opisujemy naszą propozycję rozwiązania Reagującej na Potrzeby Aplikacji, Jednoczesnej Transmisji Wielościeżkowej.

W rozdziale czwartym przedstawiamy weryfikację naszego rozwiązania zrealizowaną w symulatorze OmnetPP.

W rozdziale piątym podsumowujemy eksperymentalne wyniki proponowanego rozwiązania – sprawdzamy czy zdefiniowane cele zostały osiągnięte.

Rozdział szósty omawia pokrótce następne kroki, które można by przedsięwziąć w celu dalszego poprawienia przedstawionego rozwiązania.

Słowa Kluczowe: multi-homing, kontrola natłoku, jednoczesna transmisja wielościeżkowa, równoważenie obciążenia, sieci bezprzewodowe

Gliwice, 7 sierpnia 2020

Dr hab. inż. Dariusz Mrozek, prof. PS
Katedra Informatyki Stosowanej
Politechnika Śląska w Gliwicach
ul. Akademicka 16
44-100 Gliwice

RECENZJA

rozprawy doktorskiej dla
Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja
działającej
w Politechnice Warszawskiej

Tytuł rozprawy: Application aware, concurrent multipath traffic steering

Autor rozprawy: mgr inż. Remigiusz Prokopiak

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Przedstawiona przez Pana Remigiusza Prokopiaka rozprawa doktorska w ogólnym ujęciu jest poświęcona monitorowaniu i sterowaniu wielościeżkową transmisją danych wykorzystującą telekomunikacyjne sieci radiowe, a konkretnie protokołom i algorytmom sterowania ruchem sieciowym i transmisją danych w takich sieciach. Główna teza rozprawy mówiąca, iż opracowany *protokół AACMT działa lepiej w kontekście zdefiniowanych zasad, niż standardowa wielościeżkowa transmisja danych, która nie jest ukierunkowana na potrzeby aplikacji i możliwości kanału transmisji*, a także motywacja prowadzonych badań w tym obszarze zostały sformułowane w sposób jasny i wyczerpujący. Charakter rozprawy określiłbym jako **eksperymentalno-wdrożeniowy**, ponieważ Autor:

- zaprojektował protokół sterowania transmisją danych, w tym cztery warianty Reagującej na potrzeby aplikacji jednoczesnej transmisji wielościeżkowej, w kontekście realnie rosnącego zapotrzebowania na przepustowość łącza i potrzeby aplikacji wykorzystujących te łącza,
- dla potwierdzenia słuszności przyjętych rozwiązań przeprowadził badania symulacyjne w znanym i szeroko stosowanym środowisku OmnetPP, które pozwoliły zweryfikować, iż opracowane algorytmy i rozwiązania w zakresie sterowania transmisją danych powstałe w ramach rozprawy mogą być z powodzeniem stosowane w realnie działających systemach telekomunikacyjnych opartych o sieci WiFi i sieci mobilne LTE.

Świadczy to w mojej opinii na korzyść przedstawionej pracy.

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

Analiza światowej literatury i bieżącego stanu wiedzy w omawianym obszarze zostały przeprowadzone w sposób właściwy i świadczą o dostatecznej wiedzy Autora w tej dziedzinie. Zawartość rozdziału 2 rozprawy, który obejmuje m.in. przegląd protokołów transmisji, modeli referencyjnych (OSI i TCP/IP), metryk jakości usług (QoS), a także opis aspektów związanych z niezawodnością transmisji i przeciążeniem sieci, przegląd różnorodnych podejść stosowanych w transmisji wielościeżkowej w odniesieniu do modelu referencyjnego ISO/OSI, potwierdza, iż Autor posiada szeroką wiedzę w zakresie pierwotnych i bieżących trendów w zakresie tworzenia tego typu rozwiązań, a także zna ich zalety i słabości. W rozprawie zacytowano łącznie 83 pozycje literaturowe, z których zdecydowana większość dotyczy wyżej wymienionych elementów stanu wiedzy. Rozdział ten (rozdział 2) jest bardzo obszerny, stanowiąc świetny wstęp teoretyczny do całości rozprawy, a do pojęć w nim zdefiniowanych Autor nawiązuje w kolejnych rozdziałach pracy. Szczególną uwagę zwraca Autor na problem zapewnienia odpowiedniej jakości usług (QoS) jako całościowej charakterystyki usług telekomunikacyjnych stanowiących podstawę do wypełnienia wyrażonych i zaspokajanych potrzeb użytkownika tej usługi, starając się opracować rozwiązania algorytmiczne spełniające wybrane charakterystyki (np. maksymalizować przepustowość, minimalizować opóźnienia). Przeprowadzony przez Autora przegląd wiedzy w tym zakresie pozwolił mu w sposób jasny i przekonujący sformułować wnioski, w tym m.in. określić problemy wielościeżkowej transmisji danych w sieciach różnego typu.

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

W swoich pracach Autor sięgnął do rozwiązań wielościeżkowej transmisji tworząc protokół i bibliotekę, które umiejscowił w warstwie Aplikacyjnej, ponad warstwą Transportową. W bibliotece tej zlokalizował istotne komponenty kontroli transmisji danych, a mianowicie menadżera połączenia i menadżera ścieżki. Następnie opracował alternatywne procedury manipulacji oknem przeciążeniowym CWND (heurystyczną oraz Agile-SD-based), które wraz z dwoma autonomicznymi algorytmami sterowania przeciążeniem umiejscowił w menadżerze połączenia ConnMan. Dzięki temu Autor był w stanie zaproponować cztery różne warianty pracy biblioteki AACMT dla Reagującej na potrzeby aplikacji jednoczesnej transmisji wielościeżkowej. Na podstawie lektury rozprawy można stwierdzić, iż postawione w rozprawie zagadnienie świadomej potrzeb użytkownika i aplikacji transmisji wykorzystującej różne rodzaje sieci, przy istniejących ograniczeniach związanych z ich przepustowością i opóźnieniami, zostało rozwiązane w sposób właściwy. Autor osiągnął to poprzez: 1) identyfikację celów opracowanego protokołu AACMT zaimplementowanego w bibliotece o tej samej nazwie, 2) opracowanie procedur manipulacji oknem przeciążeniowym, 3) badania eksperymentalne weryfikujące przydatność opracowanego protokołu w symulowanym środowisku sieciowym. Odzworowanie rzeczywistego środowiska pracy w znanym środowisku symulacyjnym OmnetPP jest powszechnie stosowaną procedurą postępowania podczas testowania nowych rozwiązań w zakresie sieci telekomunikacyjnych.

4. 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?

Przedstawiona rozprawa stanowi bardzo dobre uzupełnienie bieżącego stanu wiedzy światowej w zakresie doboru alternatywnych ścieżek transmisji danych przy zachowaniu jednoczesnej świadomości chwilowych potrzeb i możliwości transmisyjnych danej sieci, a więc przy istnieniu zarówno pewnych wymagań, jak i obiektywnych ograniczeń. Ograniczenia, o których mowa, pojawiają się w rzeczywistych systemach sieciowych, w których realizacja transmisji ma istotne znaczenie określające doświadczenia abonenta korzystającego z usług operatora telekomunikacyjnego. Pan Remigiusz Prokopiak zaproponował nowatorskie podejścia w zakresie realizacji wielościeżkowej transmisji i automatycznego przełączania pomiędzy sieciami dla zmaksymalizowania jakości świadczonych usług, a także przeprowadził proces ich wnikliwej oceny. **Podjęcie tego problemu oraz opracowanie dla niego odpowiedniego podejścia, w tym w szczególności protokołu AACMT, uważam za istotne osiągnięcie Autora i zaliczam do oryginalnych wyników przedstawionych w rozprawie.** Do oryginalnych osiągnięć Autora należy również zaliczyć zaproponowane procedury manipulacji oknem przeciążeniowym oraz włączenie do realizacji protokołu autonomicznych algorytmów sterowania przeciążeniem. Wyniki przeprowadzonych prac badawczych zostały opublikowane w 3 artykułach w liczących się w dziedzinie informatyki wydawnictwach (m.in. IEEE Press, InderScience), w tym w jednym artykule w czasopiśmie *International Journal of Mobile Network Design and Innovation* (100 pkt. MNiSW) i zaprezentowane na międzynarodowej konferencji naukowej, co świadczy o istotności podjętego problemu oraz wyraźnym wkładzie Pana Remigiusza Prokopiaka w rozwój tego obszaru informatyki.

5. Czy Autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawiania uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?

Realizując pracę Pan Remigiusz Prokopiak wykazał dobre opanowanie umiejętności przedstawiania uzyskanych przez siebie wyników. Same idee zostały zaprezentowane w sposób dość jasny, sformalizowany i poparty przykładami, i co niezwykle istotne, poprzedzone szeroką analizą rozwiązań dotychczas zaprezentowanych na światowym forum naukowym. O ile forma prezentacji nie budzi większych zastrzeżeń, uważam, że dobrze byłoby gdyby Autor rozprawy czasem podkreślił i wyraźnie uwypuklił gdzie kończą się uwagi i analiza istniejących podejść, a rozpoczynają się własne rozwiązania problemu. Uwaga ta dotyczy głównie rozdziałów 3 i 4, w których Pan Remigiusz Prokopiak prezentuje autorskie podejście do przełączania ścieżki sieciowej z wykorzystaniem opracowanego protokołu i procedur. Oceny skuteczności rozwiązania dokonano w środowisku symulacyjnym zbudowanym w środowisku OmnetPP dla czterech wariantów realizacji transmisji wynikających z opracowanych procedur manipulacji oknem przeciążeniowym oraz autonomicznych algorytmów sterowania przeciążeniem. Wyniki oceny skuteczności zostały przeanalizowane i skomentowane w rozdziałach 4.11 i 5 przedłożonej rozprawy pokazując, że protokół AACMT właściwie rozpoznaje bieżącą charakterystykę ścieżki sieciowej i prowadzi transmisję w taki sposób, aby zmaksymalizować miary jakości dla zadanych priorytetów przesyłu danych. Od strony redakcyjnej praca w większości jest napisana w dobrym stylu i czyta się ją z łatwością, chociaż znalazłem w niej również kilka błędów stylistycznych i gramatycznych. Wśród krytycznych uwag odnośnie strony redakcyjnej wspomiałbym o braku odwołań do rysunków

i tabel w całej pracy oraz o niepełnych danych literaturowych w wielu pozycjach cytowanej bibliografii. Dodalbym też po paragrafie wstępu do kilku rozdziałów i podrozdziałów, które upłynniłyby narrację i umożliwiły powiązanie treści z zawartością poprzednich rozdziałów.

6. Słabe strony rozprawy i jej główne wady?

O ile praca jest bardzo ciekawa i dotyczy istotnych problemów działania i wykorzystania sieci Internet w dobie rosnących potrzeb związanych z efektywną transmisją danych, o tyle w moim osobistym odczuciu pewien niedosyt pozostawiają dwie kwestie:

- 1) Wyniki przeprowadzonych eksperymentów przedstawione w rozdziale 4 mogłyby być lepiej skomentowane w kontekście przyjętych założeń eksperymentalnych, dotyczy to szczególnie wyników opcji 4. Lepiej porównane i skomentowane powinny być również różnice, które otrzymano dla wszystkich czterech testowanych wariantów (options 1 .. 4). Taki komentarz zawarto co prawda w rozdziale 4.11, ale przydałoby się jasne i klarowne stwierdzenie, co do rekomendacji każdej z przedstawionych kombinacji rozwiązań w konkretnej sytuacji, zastosowania każdego z wariantów w pewnych (ogólnych) klasach problemów bądź obszarach, w których prowadzona ma być wielościeżkowa transmisja danych w sieciach telekomunikacyjnych.
- 2) W rozdziale 3 często pojawiają się różne parametry, których konkretne wartości zostały przyjęte przez Autora, nie wiadomo jednak dlaczego przyjęto takie, a nie inne wartości tych parametrów, np. $\alpha=0,125$ we wzorze 44, $\theta=0,05$ we wzorze 46, $\gamma=0,1$ we wzorze 47, λ dla algorytmu deflacji CWND na str. 102-103, λ_{max} i λ_{min} pod wzorem 50 i 56, oraz $CWND_{max}=20$ pod wzorem 56. Pojawia się zawsze pytanie, czy wartości te dobrano w oparciu o jakieś przesłanki lub wcześniejsze testy?

Obie uwagi nie mają charakteru znacząco krytycznego. Należy je raczej traktować jako przyczynek do szerszej dyskusji, która mogłaby się wywiązać podczas obrony niniejszej rozprawy.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Uważam, że przedłożona rozprawa doktorska Pana Remigiusza Prokopiaka wpisuje się w bieżące problemy istniejących i działających na rynku systemów informatycznych. Uwzględnienie priorytetów transmisji i dostępności ścieżki podczas transmisji danych w sieciach telekomunikacyjnych różnych typów pozwoliło Autorowi na poprawę jakości usług transmisyjnych w stosunku do istniejących rozwiązań opublikowanych w światowej literaturze, co przekłada się bezpośrednio na tworzenie lepszych rozwiązań w tym obszarze. W ten sposób zaproponowany protokół rozszerza spektrum istniejących rozwiązań stosowanych w wielościeżkowej transmisji sieciowej, a także zakres alternatywnych kanałów transmisyjnych. Potwierdzają to publikacje, których Pan Remigiusz Prokopiak jest autorem, opublikowane przez wiodące wydawnictwa, takie jak IEEE Press oraz InderScience.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

a/ nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy


b/ wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania

c/ spełniająca wymagania

d/ spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem

e/ wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

Reasumując, bardzo dobre wyniki osiągnięte przez Pana Remigiusza Prokopiaka w trakcie realizowanych przez niego badań pozwalają potwierdzić główną tezę rozprawy przedstawioną w rozdziale 1.2. Wyniki badań pokazują, że protokół oraz metody zaproponowane przez Pana Remigiusza Prokopiaka mogą przyczynić się do znaczącej poprawy jakości transmisji danych biorąc pod uwagę wymagania aplikacji i parametry łącza sieciowego. Wartość tych metod została dostrzeżona przez środowisko naukowe. Uważam zatem, że **przedstawiona rozprawa z wyraźnym nadmiarem spełnia wymagania (d)** stawiane rozprawom doktorskim określone w obowiązujących przepisach. Wnoszę o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony.



Dr hab. inż. Dariusz Mrozek, prof. PS
Katedra Informatyki Stosowanej
Politechnika Śląska w Gliwicach

Gdańsk, 25.08.2020 r.

prof. dr hab. Józef Woźniak, prof. zw. PG
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Katedra Teleinformatyki
Politechnika Gdańska

**Recenzja rozprawy doktorskiej dla Rady Naukowej Dyscypliny " Informatyka
Techniczna i Telekomunikacja" Politechniki Warszawskiej**

Tytuł rozprawy: Application-aware concurrent multipath traffic steering

Autor rozprawy: mgr inż. Remigiusz Prokopiak

- 1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

Wykorzystywane obecnie do komunikacji urządzenia końcowe użytkowników, jak również operatorskie systemy sieciowe, pozwalają na wykorzystywanie do przekazów danych i transmisji strumieniowanych kilku interfejsów. Oznacza to, że w szczególności użytkownicy sieci telefonii komórkowej (sieci gwarantującej pełną "mobilność") w miejscach, w których udostępniane są usługi WiFi albo świadomie przełączają się na takie połączenie, albo zostają przełączeni automatycznie przez operatora. Zmiana technologii dostępu radiowego może mieć na celu zarówno poprawę postrzeganej przez użytkownika jakości połączenia, jak też obciążenie, relatywnie drogiej, sieci mobilnej. Inwestycje w pojemność sieci mobilnej związane są z wieloma ograniczeniami – często zdarza się, że użytkowanie sieci WiFi jest rozwiązaniem najbardziej optymalnym pod względem zarówno kosztów operatora jak i postrzeganej jakości. Operacja przełączania pomiędzy siecią operatora i siecią WiFi jest stosunkowo łatwa, ponieważ aktualnie używane telefony komórkowe dysponują, jak wspomniano, kilkoma interfejsami radiowymi (np. LTE, WiFi - *te dwa interfejsy i stosowne rozwiązania sieciowe są przedmiotem badań Autora rozprawy*). Pomimo tego, dotychczas, jednoczesne użytkowanie wielu interfejsów dostępu radiowego nie jest praktykowane – transmisja realizowana jest z wykorzystaniem tylko jednego z kilku możliwych interfejsów.

Dla celów jednoczesnych transmisji opracowano szereg rozwiązań. Najbardziej znane to Multipath TCP (MPTCP) oraz Concurrent Multipath Transfer for Stream Control Transmission Protocol (CMT-SCTP). Rozwiązania te realizują trzy ważne zadania stawiane przed jednoczesną transmisją wielościeżkową, a mianowicie a) dostarczają zawsze lepszą jakość niż transmisja jednościeżkowa, b) nie wpływają negatywnie na transmisję jednościeżkową, korzystającą z tych samych zasobów sieciowych, c) dystrybuują natłok pomiędzy dostępne ścieżki. Żadne z dotychczasowych rozwiązań nie jest jednakże dedykowane rozwiązywaniu problemu chwilowych potrzeb aplikacji (przepływność, opóźnienie, jitter) poprzez odpowiednią alokację przesyłanych danych na dostępne ścieżki, posiadające różne charakterystyki.

Zaproponowane przez Autora rozwiązanie protokolarne AACMT opisane jako: "*Reagujące na Potrzeby Aplikacji Jednoczesnej Transmisji Wielościeżkowej*" (Application-Aware Concurrent Multipath Transmission Protocol - AACMT) wykorzystuje znane i opracowane dla protokołów TCP mechanizmy, używane do kontroli i unikania natłoku (*congestion control*), w tym przypadku w odniesieniu do transmisji wielościeżkowej. Pozwala to na spełnienie trzech wymienionych powyżej zadań, stawianych przed transmisją wielościeżkową. Dodatkowo, rozwiązanie autorskie, *co stanowi istotną nowość propozycji*, bierze pod uwagę chwilowe potrzeby aplikacji, aby lepiej wykorzystać różne charakterystyki używanych ścieżek. Ten element umożliwia poprawę jakości realizacji aplikacji. Rozwiązanie Autora jest przy tym otwarte, pod względem wykorzystywanych sieci i stosowanych w nich protokołów sieciowych – *wymaga jednakże zainstalowania agentów na obu końcach połączenia*.

Teza rozprawy w swym oryginalnym brzmieniu mówi, że: "*... the AACMT protocol performs better in terms of above-mentioned principles than multipath concurrent transmission solution, which is not aware of the instantaneous: application needs and used paths characteristics*".

Jest to zatem teza dość otwarta i raczej oczywista, chociaż bez wątplenia sformułowana poprawnie.

Szkoda, że ani w tezie ani w założeniach jej towarzyszących nie znalazły się odniesienia do warunków, przy których stosowanie przekazów wielościeżkowych i nowego protokołu AACMT jest uzasadnione, szczególnie w kontekście pewnej dodatkowej złożoności tego protokołu.

Należy jednak stwierdzić, że sama teza, towarzyszące jej założenia oraz zdefiniowane cele pracy, mające wskazać, w szczególności, zalety AACMT są zaprezentowane poprawnie.

Autor przebadął szereg rozwiązań protokolarnych, mechanizmów i algorytmów kontroli przeciążeń w sieciach.

Za pomocą eksperymentów symulacyjnych Autor wykazał, że zaproponowany dobór mechanizmów kontroli ruchu wraz z opracowanym algorytmem AACMT zapewnia dobre wykorzystanie pasma, jednocześnie gwarantując sprawiedliwy rozdział zasobów.

Praca jest napisana poprawnie. Tym niemniej Czytelnika odczuwa, w kilku fragmentach pracy, pewną trudność z określeniem kierunku, w którym zmierza Autor i konkretnego celu prowadzonych badań.

Praca ma charakter teoretyczno-doświadczalny.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł / w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle /świadczący o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Bibliografia rozprawy jest dość obszerna i zawiera ogółem 83 pozycje, wśród których znajdują się wyłącznie 2 pozycje Doktoranta („zidentyfikowane” przez recenzenta - odnoszące się do dekodowania Viterbiego). Cytowana literatura świadczy o dobrym przygotowaniu Autora i Jego ugruntowanej wiedzy w obszarze rozprawy. Autor przytacza szereg dokumentów źródłowych na temat problemów efektywności protokołów sieci IP i standaryzowanych przez 3GPP. Wykaz literatury został sporządzony wg rzadko stosowanej w

tego typu pracach zasady, a mianowicie kolejności występowania odwołań w tekście. Pozycje tych samych autorów mogą się więc pojawiać w różnych fragmentach listy.

Należy podkreślić, że wyciągane przez Autora wnioski, wynikające z analizy literatury, są poprawne.

Praca składa się z sześciu rozdziałów oraz bibliografii i wykazów rysunków, tabel i używanych skrótów, z których rozdziały 1 i 2 stanowią wprowadzenie w problematykę rozprawy. Z kolei rozdział 3 zawiera opis podstawowych założeń i modelu propozycji autorskiej. Zasadniczą część pracy stanowi rozdział 4 prezentujący zarówno środowisko symulacyjne jak też wyniki eksperymentów symulacyjnych związanych z różnymi wariantami badanego rozwiązania Application-Aware Concurrent Multipath Transmission Protocol - AACMT.

Pewnym mankamentem pracy jest fakt, że zawarte w niej oryginalne wyniki Autora nie były, w swej zasadniczej części, prezentowane w kraju i za granicą (brak jest zatem ich pełniejszej weryfikacji).

Jeżeli chodzi o szczegółowe uwagi odnośnie zawartej w pracy bibliografii to można zasygnalizować znaczną liczbę uchybień:

- Pozycje [7], [17] sprawiają wrażenie niekompletnych (przy czym [17] jest wręcz błędna).
- Niejednorodny jest sposób prezentacji propozycji dotyczących RFC. Dla przykładu: szczegółowy jest opis zawarty w [27], a lakoniczny w [33], a jeszcze inny w [74], czy [57].
- Brak jest numerów RFC dla pozycji [44] i [45].
- Błędny jest opis pozycji [54]. Zapewne podobna uwaga może mieć miejsce w odniesieniu do poz. [53].
- Odwołując się do np. wartości RTO na str. 115 Autor przywołuje RF 6298 ale odwołuje się do innych dokumentów [21] [20].
- W wykazie i w tekście pracy zdecydowanie brakuje przywoływanych w rozprawie odniesień do wariantów TCP CUBIC, RENO czy BIC.
- Pozycje [3] i [6] są pozycjami autora rozprawy. Mają jednakże taki sam tytuł. W przypadku [3] brakuje informacji o konferencji albo czasopiśmie, w którym praca została opublikowana. Pojawia się jednocześnie istotne pytanie czy są to rzeczywiście dwie różne prace.

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

Celem badań było dokonanie wyboru i poddanie analizie szeregu algorytmów kontroli przeciążeń proponowanych do wykorzystania w sieciach mobilnych, w tym także standaryzowanych przez 3GPP, w których urządzenia końcowe wyposażone są w co najmniej dwa interfejsy dostępne, pozwalające na realizację przekazów z użyciem sieci LTE oraz WiFi. Zaproponowane rozwiązanie autorskie ma za zadanie poprawę efektywności jakości przekazów realizowanych wielościeżkowo. W porównaniu ze znanymi rozwiązaniami tego typu wybór ścieżek i przenoszenie części ruchu równoległymi trasami ma być dopasowane do możliwości sieci oraz potrzeb i wymagań realizowanych aplikacji. Autor dysertacji zaproponował w tym celu szereg wariantów (modyfikacji) algorytmu AACMT, dokonując ich analizy pod kątem zdefiniowanych wymagań funkcjonalnych i kryteriów oceny.

W szczególności wykazał eksperymentalnie, że proponowane rozwiązanie AACMT zapewnia właściwą kontrolę przeciążenia z uwzględnieniem wymagań aplikacji.

Przyjęta metoda badawcza, polegająca na krytycznej analizie dotychczasowych rozwiązań, nowatorskim zaproponowaniu modyfikacji tych rozwiązań (znanych i analizowanych wcześniej w nieco innych kontekstach przekazów TCP/SCTP) i ich weryfikacji symulacyjnej jest poprawna.

Do badań eksperymentalnych Autor wykorzystał symulator OmnetPP, będący dość popularną, rozszerzalną platformą modułową, korzystającą z bibliotek do symulacji komponentów sieciowych opracowanych w języku C++. W szczególności Autor wykorzystał INET Framework, zawierający implementacje protokołów IPv4, IPv6, TCP, STCP, UDP w środowisku OmnetPP. INET dostarcza modele warstwy łącza Ethernet i 802.11 - WiFi. Pozwala też na implementację protokołów routingu. Z kolei na potrzeby symulacji systemu LTE wykorzystane zostały modele ze środowiska SimuLTE.

4. 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?

Najważniejszym wynikiem pracy jest propozycja rozwiązania Application-Aware Concurrent Multipath Transmission Protocol – AACMT, czyli algorytmu *Reagującej na Potrzeby Aplikacji Jednoczesnej Transmisji Wielościeżkowej*. Rozwiązanie to wykorzystuje dotychczas opublikowane mechanizmy, używane na potrzeby unikania i kontroli natłoku dla transmisji wielościeżkowej, dzięki czemu osiąga trzy wymagania postawione przed transmisją wielościeżkową, a mianowicie a) dostarczanie zawsze lepszej jakości niż transmisja jednościeżkowa, b) brak negatywnego wpływu na transmisję jednościeżkową korzystającą z tych samych zasobów sieciowych, c) dystrybuowanie natłoku pomiędzy dostępne ścieżki. Dodatkowo, zaproponowane rozwiązanie, bierze pod uwagę chwilowe potrzeby aplikacji, aby lepiej wykorzystać różne charakterystyki używanych ścieżek. Ten kluczowy aspekt nowego algorytmu pozwala na poprawę jakości realizowanych aplikacji.

Ważną cechą opracowanego rozwiązania jest agnostyczność pod względem wykorzystywanych sieci i używanych przez nie protokołów sieciowych – wymaga jednakże zainstalowania agentów na obu końcach połączenia.

Autor przekonująco udokumentował fakt, że nowa aplikacja AACMT prawidłowo rozpoznaje charakterystyki ścieżek i przydziela segmenty aplikacji do dostępnych ścieżek w sposób pozwalający na poprawę jakości realizowanej aplikacji - zmniejszając opóźnienia na poziomie połączenia, z wykorzystaniem informacji Prioritize Delay i w pełni wykorzystuje ścieżkę o najwyższej dostępnej przepustowości w przypadku wymagania Prioritize Throughput.

AACMT jest w stanie utrzymać niski poziom fluktuacji (poszczególnych parametrów), dzięki dynamicznej alokacji segmentów we wszystkich dostępnych ścieżkach.

Zastosowanie w AACMT rozwiązań: tzw. "w pełni sprzężonego" (Fully Coupled Algorithm) lub wielościeżkowego mechanizmu kontroli przeciążenia RTT-Compensator, pozwoliło na

zapewnienie *pożądaney* odporności realizowanych aplikacji - na poziomie połączenia - w przypadku chwilowych awarii pojedynczych ścieżek.

Badania eksperymentalne (symulacyjne) zostały przeprowadzone i udokumentowane w poprawny sposób, a wyniki zostały przeanalizowane oraz omówione dość szczegółowo. W celu realizacji powyższych badań symulacyjnych wykorzystano wspomnianą wcześniej platformę OmnetPP wraz z obszernymi bibliotekami INET oraz SimuLTE.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?

Doktorant przeprowadził wnikliwe analizy powszechnie wykorzystywanych algorytmów sterowania przepływaniami. Zaproponował też ciekawe propozycje własne oraz metody weryfikacji zaproponowanych rozwiązań. Praca napisana jest w sposób poprawny językowo. Tym niemniej wspomniane wcześniej mankamenty, dotyczące braku wyraźnych odwołań do rysunków i tabel, czy mniej starannie zaprezentowana bibliografia, a także w ocenie recenzenta brak szeregu istotnych pozycji odnoszących się do algorytmów przywoływanych w opisie pracy nieco obniżają tę ocenę.

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

Praca nie ma istotnych uchybień. Jest zredagowana poprawnie i zawiera szereg ciekawych wyników.

Pewne wybory Doktoranta, czy też prezentowane przez Niego opisy mogą jednakże wywoływać komentarze, bądź budzić wątpliwości:

1. W tezie pracy mowa jest, że: "... the AACMT protocol performs better in terms of above-mentioned principles than multipath concurrent transmission solution, which is not aware of the instantaneous: application needs and used paths characteristics".

Jest to zatem teza dość otwarta i raczej oczywista, chociaż bez wątplenia sformułowana poprawnie.

Szkoda, że ani w tezie ani w założeniach jej towarzyszących nie znalazły się odniesienia do warunków, przy których stosowanie przekazów wielościeżkowych i nowego protokołu AACMT jest uzasadnione, szczególnie w kontekście pewnej dodatkowej złożoności tego protokołu.

2. W analizie proponowanych rozwiązań brak jest oceny zastosowania zaproponowanych algorytmów w sieci z większą liczbą węzłów oraz występującym w niej zwykle ruchem tła. Aspekt ten może być szczególnie istotny zarówno w przypadku rywalizacyjnego dostępu do sieci WiFi, jak również w systemie LTE z przydziałem zasobów zgodnie ze schematem VBR. Ten aspekt może mieć szczególne znaczenie w pracy mechanizmów RTTRequest. Trudno znaleźć w pracy "uszczerbowienie" modelu transmisji w systemie LTE, w tym w szczególności informacji o częstotliwości pracy (czy jest to samo pasmo co w przypadku WiFi?), czy też algorytmie schedulera.

Także opis warunków, w których przeprowadzane były eksperymenty symulacyjne budzi pewien niedosyt.

3. Wyniki prezentowane na rysunkach 43-67 pokazują zalety opracowanych rozwiązań dla pojedynczych połączeń. Tym samym prezentowane wyniki wydają się być ilustracyjne. Pojawiają się jednakże istotne pytania:

Czy podobne rezultaty będą osiągnięte również w przypadku innych scenariuszy pracy (dłuższe ścieżki, zmienne obciążenie)?

Kiedy opracowane rozwiązanie przynosi korzyści i jaki jest tego procentowy poziom? Jakie byłyby rekomendacje odnośnie warunków stosowania poszczególnych wariantów rozwiązania autorskiego (brak w tym względzie jednoznacznych rekomendacji)?

Czy w scenariuszu najbardziej niekorzystnym można spodziewać się pogorszenia jakości połączenia (np. w przypadku złego oszacowania RTT)?

4. W pracy brakuje kilku istotnych informacji na temat warunków symulacji, w tym np. danych o ew. prędkości poruszania się terminala mobilnego. Model mobilności węzła nie został w pracy całkowicie pominięty. Jaki byłby wpływ częstszego przełączania ruchu pomiędzy ścieżkami w takich przypadkach?

5. Istotne pozostaje też pytanie na ile oprogramowanie węzła mobilnego (UE) będzie kompatybilne z oprogramowaniem innego, "klasycznego" węzła. Należy pewnie założyć, że komunikacja z wykorzystaniem AACMT będzie możliwa wyłącznie między UE, czy też UE i serwerem wyposażonymi w taką aplikację. W tym kontekście brak też w pracy jakiejś wzmianki na temat złożoności obliczeniowej poszczególnych wariantów analizowanego rozwiązania. Wszystko wskazuje na to, że narzut obliczeniowy związany z analizą poszczególnych parametrów wykorzystywanych do podejmowania decyzji nie będzie duży. Tym niemniej poprawność i kompletność analizy wymagałaby co najmniej komentarza w tekście pracy.

6. W pracy odczuwa się brak jednoznacznego porównania propozycji autorskiej (Application-Aware Concurrent Multipath Transmission Protocol - AACMT) z przytaczanymi w pracy innymi algorytmami wielościeżkowymi: Multipath TCP (MPTCP) oraz Concurrent Multipath Transfer for Stream Control Transmission Protocol (CMT-SCTP).

7. W kilku miejscach wyjaśnienia skrótów – oznaczeń pojawiają się w tekście z opóźnieniem.

8. Większym mankamentem redakcyjnym jest brak odwołań w tekście do kolejnych pojawiających się w nim rysunków i tabel. W wielu miejscach czytelnik ma problem z ich interpretacją (gdyż takiej w zasadzie nie ma). Autor częściowo niweluje ten mankament pisząc, że „coś jest zilustrowane na kolejnym rysunku”. Nie ma jednakże, przy takiej zasadzie opisu, możliwości odwoływania się do wcześniej prezentowanych wyników.

Jak wspomniano poprzednio praca zredagowana jest poprawnie. Można jednakże wskazać pewną liczbę potknięć i uchybień, częściowo wymienionych w punkcie 2 oraz innych fragmentach recenzji.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Przydatność tę można określić jako znaczną – tak praktycznie jak i potencjalnie - wynika to zarówno z rosnącego zapotrzebowania na szerokopasmowe transmisje bezprzewodowe, jak też rosnącego zainteresowania przekazami multimedialnymi w Internecie.

Zawarte powyżej uwagi nie umniejszają znaczenia rozprawy, w której przedstawiono ciekawe i oryginalne wyniki.

8. 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. **spełniająca wymagania,**
- d. spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem,
- e. wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie.

Biorąc pod uwagę zarówno niewątpliwe zalety pracy, jak też jej mankamenty zaliczam opiniowaną rozprawę do kategorii: **spełniająca wymagania** stawiane przez odpowiednie przepisy. Zatem wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Prof. Wójcik