

15.12.2022
PD ITT - wpl. ~~01.12.2022~~
M. Skowron

Recenzja rozprawy doktorskiej

Imię i nazwisko kandydata: Dariusz Marek

Tytuł rozprawy doktorskiej:

Aktywne zarządzanie pakietami w węźle komunikacyjnym z wykorzystaniem kontrolera
PID niecałkowitego rzędu

Promotor: dr hab. inż., prof. Politechniki Śląskiej Adam Domański

Recenzent: dr hab. inż., prof. IITIS PAN Krzysztof Grochla

1. Wybór tematu i cel pracy

Rozprawa dotyczy problemu sterowania działaniem węzłem pośredniczącym w sieci pakietowej. Doktorant przeprowadził badania wykorzystania kontrolera $PI^{\alpha}D^{\beta}$ będącego rozszerzeniem stosowanego od wielu lat w automatyce kontrolera PID do sterowania ruchem w sieciach IP. Badania opierają się na koncepcji aktywnego zarządzania kolejką. Tematyka rozprawy wykracza poza stan wiedzy poprzez zastosowanie kontrolera ułamkowego rzędu $PI^{\alpha}D^{\beta}$ oraz poprzez rozszerzenie metod analitycznych stosowanych do oceny efektywności transmisji w sieci komputerowej: aproksymacji dyfuzyjnej i aproksymacji płynnej (ang. fluid flow approximation).

Wybór tematyki rozprawy został dobrze umotywowany, a zakres badań podejmowanych w trakcie pracy doktorskiej jest jasno zdefiniowany. Badania nad zastosowaniem metod aktywnego zarządzania kolejką do zarządzania ruchem w sieciach pakietowych są prowadzone od ponad 20 lat, jednak ciągle istnieje przestrzeń do ich rozszerzenia np. poprzez zastosowanie nowych kontrolerów. Doktorant jest świadom postępu badań i bardzo wielu prac oceniających skuteczność działania mechanizmu RED i innych podobnych algorytmów aktywnego zarządzania kolejką. W rozdziale 1 w sposób zwięzły, ale wyczerpujący przedstawił stan wiedzy i uzasadnił konieczność przeprowadzenia badań opisanych w rozprawie. Przedstawiony przez doktoranta wniosek, iż kontroler $PI^{\alpha}D^{\beta}$ niecałkowitego rzędu może znaleźć zastosowanie w aktywnym zarządzaniu kolejką jest poprawny i stanowi solidną podstawę do podjęcia tej tematyki w pracy.

Cel realizacji badań, biorąc pod uwagę całość rozprawy, został określony poprawnie. Doktorant wykorzystuje modele analityczne i symulację zdarzeń dyskretnych do oceny efektywności mechanizmu aktywnego zarządzania kolejką o kontroler $PI^{\alpha}D^{\beta}$ niecałkowitego rzędu. Jednak w rozprawie nie do końca precyzyjnie określono, co jest celem działania kontrolera i za pomocą jakiej miary jest określana efektywność jego działania. Doktorat stawia tezę, iż kontroler $PI^{\alpha}D^{\beta}$ niecałkowitego rzędu może pozwolić na zmniejszenie średniej zajętości kolejki, a przez to na zwiększenie przepustowości transmisji danych. Samo zmniejszenie zajętości kolejki jest zjawiskiem pozytywnym, ponieważ prowadzi do zmniejszenia opóźnień transmisji pakietów ze względu na czas kolejkowania. Jednak nie jest oczywiste, iż zmniejszenie średniej długości kolejki powoduje zwiększenie przepustowości transmisji danych. Przepustowość transmisji, rozumiana jako liczba przesłanych bitów przez medium transmisyjne w jednostce czasu, zależy od fizycznych właściwości modułu transmisyjnego w sieci i ograniczeń wynikających z zastosowanego protokołu transmisji. Tym samym zmniejszenie lub zwiększenie średniej długości kolejki nie prowadzi do zmiany przepustowości sieci, a mechanizm zarządzania kolejką może mieć jedynie pośredni wpływ na przepustowość transmisji poprzez zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia braku pakietów na stanowisku obsługi. Niestety, w doktoracie nie zdefiniowano w jednoznaczny sposób metryk stanowiących o jakości działania mechanizmu zarządzania kolejką, co wpływa negatywnie na precyzję określenia celu rozprawy.

Podsumowując, wybór tematu rozprawy został dobrze umotywowany i znajduje uzasadnienie w analizie stanu wiedzy w dziedzinie. Sposób definicji celu pracy budzi pewne zastrzeżenia ze względu na brak jednoznacznej definicji celu działania mechanizmów aktywnego zarządzania

kolejką, jednak w ogólnym zakresie cel realizacji badań jest poprawny i prowadzi do badań wykraczających poza istniejący stan wiedzy.

2. Analiza źródeł i stanu wiedzy

Rozprawa składa się z wstępu, części teoretycznej opisującej podstawy matematyczne zastosowania kontrolerów $PI^{\alpha}D^{\beta}$ niecałkowitego rzędu i użyte w rozprawie modele analityczne oraz z zbioru pięciu publikacji naukowych. Dlatego opis stanu wiedzy należy ocenić zarówno na poziomie całości rozprawy, jak i poszczególnych publikacji naukowych stanowiących elementy rozprawy.

W rozdziale 1 doktorant w sposób wyczerpujący opisuje stan wiedzy w zakresie metod aktywnego zarządzania kolejką. Doktorant wykazał się dużą wiedzą na temat historii rozwoju algorytmów AQM, w tym algorytmu RED i późniejszych metod będących jego rozwinięciem. Dobór cytowanych prac jest poprawny i doktorant dobrze dobrał reprezentatywne i najważniejsze prace w opisywanym obszarze. W rozdziale 2 i 3 doktorant zawarł opis rachunku różniczkowego i różnicowego ułamkowego rzędu oraz opisał kontroler PID ułamkowego rzędu. Opis stanu wiedzy jest w pełni poprawny i nie zawiera błędów merytorycznych, jest także dobrze oparty na cytowanej literaturze. Opis działania kontrolera długości kolejki został zilustrowany kodem źródłowym w języku Python, co z jednej strony pozwala na precyzyjną weryfikację poprawności implementacji jego działania, jednak z drugiej strony zmniejsza czytelność rozprawy, ponieważ kod źródłowy został rozbity na 3 strony. Zastrzeżenia budzi zakończenie opisu kontrolera PID stwierdzeniem, iż „Efektywność mechanizmu AQM opartego o regulator niecałkowitego rzędu PID w dużym stopniu zależy od właściwego doboru parametrów tego kontrolera” bez odwołania do literatury lub innych elementów rozprawy. Fakt dużego znaczenia doboru parametrów zwykłego kontrolera PID na poprawność sterowania i jego stabilność jest powszechnie znany. W przypadku kontrolera ułamkowego rzędu liczba dobieranych parametrów zostaje zwiększona. Dlatego szkoda, że doktorant nie pokusił się o dodatkowe odniesienie do literatury opisujących problematykę doboru parametrów kontrolera PID, w szczególności w kontekście zastosowania do aktywnego zarządzania kolejką. Jednak mimo tych niewielkich niedoskonałości przegląd literatury w zakresie części teoretycznej i wprowadzającej rozprawy należy uznać za poprawny i wyczerpujący.

Założenia do badań przyjęte w 5 artykułach stanowiących elementy części badawczej rozprawy są dobrze umotywowane przez odniesienia do literatury. Doktorant bardzo dobrze opisał badania stanowiące punkt odniesienia do poszczególnych prac, dotyczące implementacji kontrolerów PID ułamkowych rzędów za pomocą biblioteki CUDA, modeli aproksymacji dyfuzyjnej i płynnej oraz analizy wpływu mechanizmów AQM na efektywność sieci w zawartych w poszczególnych pracach scenariuszach. Zakres zrealizowanych badań i uzasadnienie podjętych metod badawczych jest dobrze umotywowane odniesieniami do literatury naukowej.

3. Metodyka i sposób rozwiązania problemu badawczego

Zakres badań zrealizowanych w ramach doktoratu można podzielić na dwa główne obszary:

- przyspieszenie czasu obliczeń kontrolera $PI^{\alpha}D^{\beta}$ z wykorzystaniem układu GPU oraz technologii CUDA.
- wykorzystanie aproksymacji dyfuzyjnej do oceny mechanizmów aktywnego zarządzania kolejką AQM i mechanizmów unikania przeciążeń

Implementacja mechanizmu kontroli długości kolejki za pomocą kontrolera $PI^{\alpha}D^{\beta}$ w oparciu o układ GPU została wykonana poprawnie. Doktorant bardzo dobrze zastosował moduły umożliwiające wykorzystanie możliwości układów graficznych dostępne w języku Python. Następnie przeprowadził rzetelne testy wydajności zaimplementowanego algorytmu i zweryfikował jego działanie na 3 różnych układach firmy NVIDIA, porównując z wydajnością 3 klasycznych układów CPU. Testy czasów obliczeń są zrealizowane w sposób obszerny, dla różnych długości kolejek i różnych scenariuszy. W pracy uwzględniono także narzut związany z komunikacją pomiędzy CPU, a GPU. Podsumowując, badania zostały zrealizowane w sposób kompletny, a wynik jest wiarygodny.

Metodyka prac nad modelami analitycznymi mechanizmów aktywnego zarządzania kolejką została dobrze przemyślana i jest poprawna. Doktorant bardzo dobrze wykorzystał stan wiedzy w zakresie rozwoju modeli aproksymacji dyfuzyjnej, opierając się na najnowszych wynikach prac w tym obszarze. Zastosował model stanowiska obsługi G/G/1/N z ograniczoną liczbą klientów, który jest konieczny do analizy działania algorytmu zarządzania kolejką w celu oceny wpływu długości kolejki i sposobu zarządzania kolejką na transmisję danych. Równania modelu dyfuzji zostały poprawnie rozbudowane przez doktoranta w celu uwzględnienia sposobu działania kontrolera $PI^{\alpha}D^{\beta}$ niecałkowitych rzędów. Bardzo dobrze, że doktorant dokonał weryfikacji wyników działania modelu analitycznego poprzez porównanie z symulacją zdarzeń dyskretnych, a zawarte w pracach wykresy np. średniej długości kolejki wskazują na dużą zgodność obydwu modeli. Jednak taka weryfikacja została zrealizowana tylko w części artykułów stanowiących elementy rozprawy – w wynikach opisanych w rozdziale 8, 9 i 10 jej zabrakło. W rozprawie brakuje niektórych szczegółowych informacji na temat parametrów modelu symulacyjnego (np. przepustowości kanału transmisyjnego) oraz sposobu weryfikacji poprawności symulacji. Jest to jednak uzasadnione przyjętą formułą doktoratu (połączenie kilku publikacji) i koniecznością spełnienia wymagań wynikających z ograniczonego rozmiaru poszczególnych artykułów. Przyjęty sposób rozwoju modeli analitycznych jest poprawny i potwierdza znajomość nowoczesnych metod analizy wydajności sieci komputerowych.

Należy podkreślić, że doktorant w pracy wykazał się bardzo dobrą znajomością rachunku różniczkowego, rachunku różniczko-całki i zastosowania równań różniczkowych do opisu przepływu danych w sieciach komputerowych. Warsztat matematyczny przedstawiony w pracy stoi na bardzo wysokim poziomie, a metody analityczne zostały prawidłowo dobrane do postawionych problemów.

Pewne zastrzeżenia budzi metodyka weryfikacji poprawności wyników modeli analitycznych oraz sposób porównania ich wyników w rozdziale 10. Doktorant zestawia ze sobą wyniki aproksymacji dyfuzyjnej oraz aproksymacji płynnej. Brak jednak w pracy parametrów

pozwalających na porównanie wyników prezentowanych na parach wykresów. Osiągnięta przepustowość połączenia TCP dla aproksymacji dyfuzyjnej jest podawana w innych jednostkach (λ) niż dla aproksymacji płynnej (w). W rozdziale trudno doszukać się informacji, czy zweryfikowano realność uzyskanych wyników, tzn. czy np. wyliczona z modelu przepustowość połączenia TCP nie przekracza przepustowości kanału transmisyjnego (parametru C dla aproksymacji płynnej). Dla aproksymacji dyfuzyjnej założono inną charakterystykę stanowiska obsługi niż dla aproksymacji płynnej (zmienny rozkład czasu obsługi względem stałej przepustowości kanału transmisyjnego). Kształt uzyskanych wykresów wskazuje na podobny charakter uzyskanych wyników, co sugeruje poprawność uzyskanych wyników, jednak brak potwierdzenia zgodności modeli na poziomie liczb wskazuje na niedoskonałość przyjętej metodologii.

Podsumowując, autor wykazał w części badawczej rozprawy, że potrafi dobrze dobrać narzędzia badawcze, rozwiązać postawiony problem i przebadać efektywność zaproponowanych mechanizmów aktywnego zarządzania kolejką. Mimo pewnych niedoskonałości metodyki w zakresie porównania i walidacji wyników modeli, wyniki przedstawionych prac wskazują, że doktorant potrafi zaplanować badania oraz prawidłowo zebrać i przeanalizować wyniki eksperymentów numerycznych.

4. Oryginalność rozprawy

Do najważniejszych osiągnięć naukowych doktoranta należy zaliczyć:

- implementacja mechanizmu kontroli długości kolejki za pomocą kontrolera $PI^{\alpha}D^{\beta}$ w oparciu o układ GPU
- opracowanie nowego modelu analitycznego opartego o aproksymację dyfuzyjną mechanizmu kontroli długości kolejki za pomocą kontrolera $PI^{\alpha}D^{\beta}$ niecałkowitego rzędu
- opracowanie metody połączenia aproksymacji dyfuzyjnej z symulacją zdarzeń dyskretnych w badaniu efektywności mechanizmów aktywnego zarządzania kolejką
- rozszerzenie modeli aproksymacji płynnej o możliwość analizy kontrolera AQM opartego o $PI^{\alpha}D^{\beta}$ niecałkowitego rzędu

Badania przeprowadzone w trakcie prac nad rozprawą doktorską są oryginalne i wykraczają poza stan wiedzy we wszystkich w/w obszarach. W szczególności, istotny jest wkład doktoranta w rozwój metodyki analizy efektywności sieci komputerowych i systemów informatycznych za pomocą aproksymacji dyfuzyjnej. Doktorant nie tylko jako pierwszy opracował model kontrolera $PI^{\alpha}D^{\beta}$ niecałkowitego rzędu w zastosowaniu do kontroli długości kolejki, ale także przyczynił się w sposób twórczy do prac nad połączeniem aproksymacji dyfuzyjnej i symulacji zdarzeń dyskretnych. Dotychczas te dwie metody były stosowane rozłącznie lub używane do wzajemnej walidacji poprawności obliczeń. Opracowany przez doktoranta sposób połączenia i naprzemiennego obliczania wyników symulacji i modelu aproksymacji dyfuzyjnej jest nowatorskie i wykracza poza stan wiedzy, a zaproponowana koncepcja ma duży potencjał do dalszego wykorzystania w badaniach efektywności innych mechanizmów zarządzania ruchem w sieciach komputerowych.

Wnioski postawione przez autora w podsumowaniu rozprawy potwierdzają oryginalność wyników pracy. Ważnym elementem pracy jest zwłaszcza drugi wniosek, który podsumowuje wyniki autora dotyczące porównania 2 metod: aproksymacji dyfuzyjnej i aproksymacji płynnej w modelowaniu tego samego mechanizmu aktywnego zarządzania kolejką. Doktorant słusznie zauważa, że opracowany przez niego model za pomocą aproksymacji dyfuzyjnej pozwala na bardziej szczegółową analizę zachowania kolejki i modelowanie bardziej złożonych scenariuszy transmisji niż wcześniejsze modele wykorzystujące aproksymację płynną. Potwierdza to wysoką oryginalność prowadzonych badań.

Mimo, iż doktorat opiera się na 5 publikacjach wieloautorskich, to treść rozprawy i załączone do niej oświadczenia współautorów świadczą, że wkład doktoranta we wszystkich przedstawionych pracach był kluczowy i dotyczył merytoryki prowadzonych badań. Doktorant we wszystkich pracach uczestniczył w rozwoju opracowywanych modeli analitycznych, gromadzeniu i analizie wyników, a oświadczenia współautorów wskazują, że jego udział zawsze wynosił co najmniej 60%. Potwierdza to, iż rozprawa stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora.

5. Poprawność redakcyjna rozprawy

Rozprawa została przygotowana poprzez połączenie 5 artykułów naukowych z wstępem teoretycznym i streszczeniem. Praca składa się ze wstępu, 3 rozdziałów opisujących wykorzystane elementy rachunku różniczkowego i metody oceny efektywności mechanizmów działających w sieciach komputerowych, opisu publikacji na których oparto rozprawę, 5 rozdziałów zawierających treść poszczególnych publikacji oraz podsumowania. Struktura pracy jest przejrzysta i klarowna. Podział rozprawy na rozdziały uwzględnia spójność tematyczną prac realizowanych na poszczególnych etapach i jest czytelny.

Większość wyników przedstawionych w rozprawie jest opisana w sposób poprawny i zaprezentowana w postaci wykresów lub tabel. Jednak na uwagę zwraca brak konsekwencji i klarowności w opisie części z wykresów. W największym stopniu problem ten dotyczy wykresów przedstawionych w rozdziale 10, w którym zestawiono wyniki aproksymacji dyfuzyjnej z wynikami aproksymacji płynnej (wykresy 2 – 18), lecz dla obliczonych przepływności bitowych połączenia TCP użyto różnych jednostek, w dodatku nie podając jakich. Trudno więc dokonać weryfikacji, czy wyniki są poprawne i zgodne ze sobą. Także wykresy przedstawiające w rozdziale 7 (wykresy 1-7) na osi rzędnych zostały opisane z prawej strony (dla intensywności źródła) zostały opisane jedynie literą λ , podobnie jak opis wykresu w legendzie, bez wskazania jednostki, w której jest mierzona intensywność. Podobnie w rozdziale 9 na wykresach przedstawiających intensywność źródła TCP w czasie (wykresy 2 – 17) nie podano jednostki, jednak tutaj z tekstu artykułu można wywnioskować, że jest ona mierzona w pakietach na sekundę.

Praca jest poprawna pod względem językowym i jest napisana w sposób czytelny. Opracowane algorytmy są przedstawione w postaci schematów blokowych lub kodu źródłowego, co ułatwia ich wykorzystanie w dalszych badaniach. Jednak rozprawa zawiera pewne błędy redaktorskie.

W pracy brak jest poważnych błędów redakcyjnych. Użyta terminologia jest poprawna i spójna z używaną w literaturze naukowej dziedziny, a w poszczególnych artykułach doktorant precyzyjnie definiuje znaczenie poszczególnych symboli. Występują jedynie drobne błędy, w tym:

- nazwisko Grünwald w części pracy jest zapisane w wersji oryginalnej, a w części pracy w pisowni spolszczonej „Grunwald”
- str. 29 podrozdział 2.4.2 akapit 3: "Dla tak zdefiniowanych założeń, definicja różnicy niecałkowitego wyrażona jest następująco:" - brakuje słowa "rzędu"
- str. 46 czwarta linia: "mogą być również dotyczyć" – słowo być jest użyte nadmiarowo.
- wzór (2.2) na str 18 został błędnie sformatowany, w wyniku czego ułamek z którego liczona jest granica trafił pod symbol granicy
- str. 31 wzory (3.3) i (3.4) są identyczne jak wzory (2.33) i (2.34) na stronie 27, zamiast ich powtórzenia autor powinien umieścić referencję do wcześniejszych wzorów
- analogicznie na str. 32 wzory (3.5) są identyczne jak wzory (2.37) oraz (2.38) na stronie 27.

Podsumowując, autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników, a wskazane powyżej niewielkie błędy nie zmniejszają ogólnej bardzo dobrej oceny poprawności redakcyjnej rozprawy.

6. Uwagi krytyczne

Prace badawcze koncentrują się na analizie działania aktywnego zarządzania kolejką w interakcji z algorytmem regulacji okna (unikania kolizji) protokołu TCP w wersji NewReno. Algorytm ten został opisany w 1999 roku w dokumencie RFC 2582. W latach dwutysięcznych zaproponowano kilka nowszych algorytmów zarządzania oknem TCP, z których największą popularność zdobył TCP CUBIC, używany jako domyślny w jądrach systemu Linux po 2.6.19 (w tym domyślny np. w najnowszych wersjach dystrybucji Ubuntu) oraz używany jako domyślny w Windows 10. Dlaczego w doktoracie skoncentrowano się na analizie algorytmu zarządzania oknem w wersji NewReno, a pominięto nowsze, powszechnie stosowane wersje tego algorytmu?

Doktorant dokonał walidacji poprawności modeli analitycznych poprzez porównanie z symulacją utworzoną w środowisku SimPy. Opis modelu symulacyjnego jest jednak bardzo skrócony i nie zawiera informacji na temat sposobu weryfikacji działania samego symulatora. Dlaczego zdecydowano się na zastosowanie symulatora SimPy i czy model komunikacji za pomocą protokołu TCP był autorskim rozwiązaniem doktoranta? Dlaczego nie skorzystano ze środowisk symulacyjnych oferujących kompletny model stosu TCP/IP, jak np. OMNeT++ / INET lub NS3?

Głównym elementem rozprawy jest analiza działania kontrolera $PI^{\alpha}D^{\beta}$ niecałkowitych rzędów zastosowanego do aktywnego sterowania długością kolejki. Jest on porównywany do klasycznego algorytmu RED oraz do jego późniejszych modyfikacji, jak np. NLRED. W pracy jednak bardzo mało miejsca poświęcono na porównanie efektywności działania kontrolera $PI^{\alpha}D^{\beta}$ niecałkowitych rzędów do kontrolera PID całkowitego rzędu, który, jak słusznie zauważa

autor rozprawy, także był używany do aktywnego sterowania długością kolejki. Skoro przyjęty kontroler jest uogólnieniem kontrolera PID i w szczególności, dla $\alpha=1$ oraz $\beta=1$ może działać jak klasyczny regulator PID, to czy opracowany model może stanowić narzędzie do analizy, w jakich warunkach efektywniejsze jest zastosowanie kontrolera ułamkowego rzędu?

Analiza działania kontrolera $PI^{\alpha}D^{\beta}$ niecałkowitych rzędów koncentruje się na ocenie średniej długości kolejki i przepustowości, wyliczonej z wzorów teoretycznych. Na części z wykresów przedstawiających wyniki opracowanych modeli trudno ocenić, jak wyliczona przepustowość ma się do przepustowości kanału transmisyjnego. W szczególności, w pracy „Approximation models for the evaluation of TCP/AQM networks” na rysunku 7 wyliczona przepustowość w przypadku braku ruchu UDP dla mechanizmu NLRED wynosi około 14 [w] w modelu aproksymacji płynnej, a około 1 [λ] w modelu aproksymacji dyfuzyjnej. Dlaczego przyjęto różne jednostki na wykresach przedstawiających ten sam pomiar? Skąd tak duża rozbieżność i jaka była maksymalna przepustowość kanału transmisyjnego założonego w modelu? Dodatkowo, po uruchomieniu transmisji UDP przepustowość spada, lecz znacznie mniej niż natężenie transmisji pakietów UDP (w modelu aproksymacji płynnej można przy transmisji UDP o natężeniu około 5 jednostek w można zaobserwować spadek przepustowości strumienia TCP o około 1 jednostkę. Czy oznacza to, że TCP nie było w stanie wypełnić całości dostępnej przepustowości kanału transmisyjnego w przypadku braku innego ruchu, czy może świadczy to o niedoskonałości modelu i wyliczonej przepustowości 2 strumieni przekraczającej dostępne możliwości kanału transmisyjnego?

Doktorant w kilku miejscach pracy stwierdza, że dobór parametrów kontrolera PID oraz kontrolera $PI^{\alpha}D^{\beta}$ niecałkowitych rzędów jest zagadnieniem trudnym i w znaczący sposób wpływa na działanie mechanizmu aktywnego zarządzania kolejką. Jednak we wszystkich analizowanych przypadkach doktorant ustalił parametry zarówno kontrolera PID, jak i parametry porównywanych z nim algorytmów RED lub podobnych. W jaki sposób dobrano te parametry i dlaczego akurat takie wartości uznano za reprezentatywne?

7. Podsumowanie i ocena końcowa

Praca doktorska pt. „Aktywne zarządzanie pakietami w węźle komunikacyjnym z wykorzystaniem kontrolera PID niecałkowitego rzędu” została przygotowana przez magistra inżyniera Dariusza Marka bardzo rzetelnie i potwierdza zdolność kandydata do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Praca jest poprawna pod względem metodologicznym, a opracowane modele aproksymacji dyfuzyjnej i aproksymacji płynnej mechanizmów AQM wykorzystujących regulator PID niecałkowitego rzędu są rozwiązaniami nowatorskimi, wykraczającymi poza stan wiedzy. Badania zostały poprawnie zaplanowane i zrealizowane, a ich wyniki szczegółowo opisane. Doktorant jest w stanie poprawnie wyciągnąć wnioski z przeprowadzonych badań i rzetelnie je uzasadnić. Doktorant wykazał się także bardzo dużą wiedzą z zakresu rachunku różniczkowego i zastosowania równań różniczkowych do analizy efektywności sieci komputerowych. Praca tym samym potwierdza, iż kandydat posiada wymaganą wiedzę teoretyczną w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Wyżej wymienione cechy, a zwłaszcza istotny wkład doktoranta w rozwój dziedziny wiedzy i

bardzo dobre opanowanie zaawansowanego aparatu matematycznego świadczą, iż prac doktorska magistra inżyniera Dariusza Marka jest wybitnie dobra i zasługuje na wyróżnienie.

Ja, niżej podpisany stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska magistra inżyniera Dariusza Marka spełnia warunki określone w art. 187 ust. 1 i 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 r., poz. 1668 z późn. zmianami) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja o dopuszczenie Pana Dariusza Marka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

9.12.2022

.....
data sporządzenia recenzji

Wojciech Goch
.....
podpis recenzenta