

dr hab. inż. Andrzej Bęben
Instytut Telekomunikacji
Politechnika Warszawska

Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy: Zapewnianie jakości transmisji danych w sieci komputerowej w sposób zdecentralizowany z zastosowaniem metod agentowych oraz uczenia maszynowego

Autor rozprawy: mgr inż. Dariusz Żelasko

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Paweł Pławiak, prof. PK i IITIS

Dziedzina rozprawy: nauki techniczne

Dyscyplina: Informatyka Techniczna i Telekomunikacja

1 Jaki jest problem naukowy (teza) rozprawy i cel pracy?

Rozprawa doktorska dotyczy opracowania rozproszonego systemu sterowania rozpięciem ruchu w sieci komputerowej, nazwanego systemem „Pay & Require”, którego celem jest zapewnienie możliwości różnicowania jakości obsługi strumieni danych przekazywanych w sieci bazującej na komutacji pakietów. Proponowane rozwiązanie wykorzystuje rozproszony wieloagentowy system sterowania, który odpowiada za wybór drogi przekazu strumieni danych przez węzły (rutery) w sieci lokalnej zbudowanej w oparciu o technikę Ethernet/IP. Decyzje o wyborze drogi są podejmowane na podstawie informacji o wymaganiach użytkownika oraz danych o bieżącym stanie sieci dostarczanych przez system monitorowania, wykorzystując metody dynamicznego kształtowania cen usług bazujących na metodach rynkowych (system aukcji). Ponadto, w rozprawie zastosowano metody uczenia maszynowego do klasyfikacji charakterystyk przekazu strumieni danych, wyrażonych i) przepływnością bitową ścieżek, ii) opóźnieniem przekazu pakietów, iii) zmiennością tego opóźnienia, oraz iv) poziomem strat pakietów, do pięciu klas jakości QoE (Quality of Experience), związanych z jakością postrzeganą przez użytkowników.

W rozprawie sformułowano następującą tezę: „Możliwe jest różnicowanie jakości usługi, jaką jest transmisja danych, poprzez zastosowanie systemu wieloagentowego do sterowania siecią tak, aby usługa realizowana była na poziomie oczekiwanym przez użytkownika”

Główną tezę pracy sformułowano w sposób jasny i precyzyjny. Teza została wykazana eksperymentalnie, przez przeprowadzenie eksperymentów w zaimplementowanym modelu systemu. Model zbudowano wykorzystując zarówno narzędzia symulacyjne bazujące na symulatorze NS3, jak i środowisko emulatora sieci bazujące na ruterach programowych Vyatta. Pewien niedosyt budzi brak modelu analitycznego i ograniczony zakres przeprowadzonych eksperymentów, w szczególności brak eksperymentów dotyczących oceny efektywności działania proponowanego opracowanego systemu

„Pay & Require”, w przypadku wykorzystania proponowanych algorytmów klasyfikacji bazujących na metodach uczenia maszynowego na efektywności.

Oceniając cel i zakres rozprawy należy zwrócić uwagę, iż rozprawa wpisuje się w szeroki nurt badań dotyczących opracowania metod rutowania QoS (*Quality of Service*), które to metody umożliwiają wyznaczenie ścieżek przekazu strumieni danych gwarantujących zapewnienie lub jedynie różnicowanie parametrów jakości obsługi w sieciach jedno- i wielo-domenowych. Badania te są prowadzone od wielu lat i w ich efekcie opracowano wiele rozwiązań zarówno teoretycznych, jak i praktycznych, które z powodzeniem wdrożono w sieciach. Należy podkreślić, iż wykorzystanie metod dynamicznego kształtowania cen usług, które są wspierane metodami uczenia maszynowego jest oryginalnym podejściem o znaczącym potencjale badawczy.

2 Układ rozprawy doktorskiej

Rozprawa zawiera 6 rozdziałów, obejmujących „Wstęp” i „Podsumowanie” oraz cztery główne rozdziały merytoryczne. Rozdział 1 zawiera przegląd metod i technik stosowanych w sieciach dla zapewnienia jakości przekazu strumieni danych. W szczególności autor przedstawił podstawowe pojęcia i definicje dotyczące jakości obsługi zaproponowane w zaleceniach organizacji standaryzacyjnych ITU-T, ETSI, IETF, oraz przedstawił podstawowe architektury oraz rozwiązania stosowane w sieciach IP dla zapewnienia jakości obsługi, tj. IntServ, DiffServ, MPLS, RSVP, RSVP-TE, a także przedstawił założenia nowej techniki sieci programowalnych SDN (*Software Defined Network*). Ponadto, autor przedstawił w opisowy sposób metryki dotyczące jakości tj. QoS i QoE, choć w mojej ocenie brakuje przytoczenia ich ścisłej definicji, zawartej np. w zaleceniu ITU-T Y.1541 lub zaleceniach grupy roboczej IETF IPPM. W dalszej części rozdziału, autor przedstawił podstawowe metody rutowania, tj. metody wykorzystujące informacje o stanie łączy oraz metody tzw. wektor odległości, a także podstawowe protokoły rutowania stosowane w sieciach pakietowych, tj. RIP, OSPF, EIGRP, BGP, DSR, PBR. Niewątpliwie w rozdziale tym brakuje analizy i wniosków dotyczących aktualnego stanu badań dotyczących metod QoS rutowania oraz omówienia przykładowych rozwiązań, np. MP-BGP, OSPF-TE, MPLS-TE, gdyż proponowane w pracy rozwiązanie należy do tej rodziny rozwiązań. Podsumowując, przedstawiona analiza świadczy o dość dobrej znajomości tematyki zapewnienia jakości obsługi w sieciach, choć w mojej ocenie brakuje przedstawienia koncepcji klas usług, zasad ich tworzenia oraz omówienia metod i mechanizmów wymaganych w sieci dla ich realizacji.

W rozdziale 2 przedstawiono koncepcję rozproszonego systemu wieloagentowego, omówiono cechy budujących go agentów oraz przedstawiono ich klasyfikację ze względu na ich architekturę i sposób działania. Ponadto, w rozdziale przedstawiono problem alokacji dóbr wykorzystujących mechanizm aukcji. Omówiono różne techniki prowadzenia aukcji, w tym aukcji wielu dóbr jednocześnie. Rozdział ten zawiera również przegląd metod sterowania siecią wykorzystujących systemy agentowe. Przedstawiona w rozdziale analiza świadczy o dobrej znajomości tematyki, jednakże w mojej ocenie, zwłaszcza w rozdziale 2.3, brakuje podsumowania i omówienia wniosków dotyczących ograniczeń proponowanych w literaturze rozwiązań, które to wnioski stanowiły motywację dla przedstawionych w rozprawie prac.

Rozdział 3 przedstawia opracowany system „Pay & Require”, którego celem jest zapewnienie możliwości różnicowania jakości obsługi dla strumieni danych przez wybór odpowiednich ścieżek

przekazu danych oraz zastosowanie mechanizmu aukcji. Głównym założeniem systemu jest zachowanie szeroko rozumianej elastyczności użytkownika, która przejawia się możliwością dostosowania wymagań dotyczących jakości przekazu strumieni danych lub wręcz rezygnacji z usługi ze względu na jej cenę wynikającą z zastosowanego systemu dynamicznej taryfikacji bazującej na systemie aukcyjnym. W rozdziale przedstawiono architekturę systemu, opracowaną w oparciu o architekturę rozproszonych systemów wieloagentowych oraz architekturę sieci programowalnych. System wykorzystuje metodę reaktywnego sterowania rozpiętością ruchu w sieci bazującą na estymacji charakterystyk jakości przekazu pakietów na ścieżkach w oparciu o cykliczny, aktywny pomiar charakterystyk przekazu pakietów na poszczególnych łączach. W systemie dopuszczono możliwość dynamicznej rekonfiguracji ścieżek w przypadku wykrycia degradacji jakości wymaganej przez użytkownika. Usługi przekazu danych są udostępniane użytkownikom na zasadach rynkowych, wykorzystując mechanizm dynamicznego kształtowania cen (mechanizm aukcji), w którym parametry jakości przekazu strumieni mogą być traktowane jako odrębne dobra. Funkcje udostępniania usług są realizowane przez warstwę „rynku” zdefiniowaną w architekturze systemu. W rozdziale 3 przedstawiono również opracowane środowiska eksperymentalne bazujące na ruterach programowych Vyatta oraz symulatorze NS3 oraz omówiono podstawowe procesy realizowane w systemie. W szczególności omówiono zastosowaną metodę rutingu bazującą na technice rutingu źródłowego oraz zastosowany algorytm wyznaczania ścieżek bazujący na znanych algorytmach zalewowego poszukiwania (flood search) adresu przeznaczenia. Ponadto, w rozdziale 3 zaproponowano metodę klasyfikacji zbiorów charakterystyk przekazu pakietów do 5 klas jakości, która wykorzystuje subiektywny pomiar jakości QoE zrealizowany w oparciu o ocenę 100 próbek przez 4 użytkowników. Uzyskane wyniki stanowiły podstawę dla oceny efektywności działania metod klasyfikacji zbiorów parametrów jakości przekazu strumieni danych bazujących na metodach uczenia maszynowego.

Oceniając zakres merytoryczny rozdziału należy stwierdzić, iż zamieszczony opis systemu „Pay & Require” jest dość fragmentaryczny. Brakuje systematycznego opisu zastosowanych algorytmów, opisu sekwencji wymiany wiadomości pomiędzy elementami systemu (poza jednym przykładowym diagramem), np. w postaci diagramów stanów lub diagramów sekwencji wymiany wiadomości. W szczególności nie przedstawiono sposobu działania systemu monitoringu, który jest kluczowy dla oceny efektywności działania projektowanego systemu. Również moje wątpliwości budzi wiarygodność przyjętego modelu oceny subiektywnej jakości. Nie przedstawiono jaki zbiór danych był analizowany, poza informacjami, że analizowano 100 próbek, brakuje informacji o tym w jakich warunkach zostały zebrane, w jakiej sieci, w jakich relacjach. Ponadto brakuje dyskusji, na ile są one reprezentatywne dla rozważanych usług strumieniowania obrazów wideo oraz dostępu do stron internetowych, a także czy mogą być stosowane dla innych rodzajów usług. W mojej opinii głębsza analiza jest niezbędna, ze względu na fakt, iż opracowany model klasyfikacji jest podstawą dla dalszych prac dotyczących zastosowania algorytmów klasyfikacji bazujących na metodach uczenia maszynowego.

Rozdział 4 zawiera opis przeprowadzonych eksperymentów oraz przedstawia uzyskane wyniki i wnioski. Zasadniczo obejmuje on cztery główne części. W rozdziale 4.1 przedstawiono wyniki eksperymentów przeprowadzonych z wykorzystaniem ruterów programowych Vyatta. W tym przypadku rozważano sieć zbudowaną z 4 lub 9 ruterów i zilustrowano działanie systemu w przypadku różnych scenariuszy obciążenia sieci. Uzyskane wyniki wskazują, że w rozważanych przypadkach system był w stanie wybierać ścieżki zgodnie z wymaganiami użytkownika. Istotnym

mankamentem przeprowadzonych badań jest brak szczegółowego opisu i wyjaśnienia przyjętych założeń. W szczególności brak szczegółowego opisu warunków ruchowych (jaki profil rurowy, jakie obciążenia w jakich relacjach), wyjaśnienia przyczyn rozważania innych metryk jakości niż zbioru metryk przyjętych w rozdziale 3 i modelu QoE, np. rozważane jest opóźnienie przekazu pakietów w pętli RTT (*Round Trip Time*) oraz czas przekazu zbioru danych o ustalonym rozmiarze. W rozdziale 4.2 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych dotyczących oceny efektywności metody „Pay & Require”. W tym przypadku rozważono sieć z 4 węzłami (taką samą jak w przypadku emulacji) oraz sieć zbudowaną z 12 węzłów obejmującą swoim zasięgiem terytorium Polski. Podobnie jak w eksperymentach przedstawionych w rozdziale 4.1, brakuje szczegółowego opisu warunków przeprowadzenia eksperymentu, np. warunków ruchowych. Ponadto, część założeń przyjęto dość arbitralnie nie tłumacząc ich konsekwencji, np. opóźnienie przekazu na wszystkich łączach wnosi 1 ms, pomimo umieszczenia węzłów w różnych lokalizacjach geograficznych, np. Białystok, Rzeszów, Kraków. Porównując wyniki uzyskane w symulacjach z wynikami dla emulacji, można zauważyć znaczące różnice, np. czas przekazu zbioru danych wynosi 6,5 s w eksperymencie symulacyjnym, podczas gdy w odpowiadającym mu eksperymencie wykorzystującym emulację wynosi 27,6s. Nie przeprowadzono dogłębnej analizy przyczyn tych rozbieżności.

W kolejnym rozdziale 4.3 przedstawiono wyniki eksperymentów dotyczących oceny systemu aukcji, w ramach których zbadano koszt ponoszony przez użytkowników w przypadku zastosowania trzech strategii przeprowadzenia aukcji, które obejmują jednokrotne i wielokrotne aukcje jednego dobra. Przedstawiono również schemat działania w przypadku aukcji kombinatorycznych obejmujących wiele dóbr jednocześnie. Przedstawione wyniki są interesujące, aczkolwiek wydają się przeprowadzone nieco niezależnie od działania opracowanego systemu „Pay & Require”. Ostatnia część, rozdział 4.4 dotyczy opracowania algorytmu klasyfikacji zbiorów charakterystyk przekazu pakietów do 5 klas jakości bazujących na metodach uczenia maszynowego. W tym celu oceniono skuteczność klasyfikacji 9 typów klasyfikatorów, m.in. Random Forest, Neares Centroid, kNN, Decision Tree, wytrenowanych na podstawie danych pochodzących z modelu QoE przedstawionego w rozdziale 3. Po analizie skuteczności tych algorytmów zaproponowano sześć własnych algorytmów stanowiących kombinacje najlepiej rokujących typów klasyfikatorów. Uzyskane wyniki badań wskazały najlepszą kombinację zastosowanych klasyfikatorów. W mojej ocenie badania przeprowadzono zgodnie ze stanem sztuki. Jediną wątpliwość budzi fakt, że nie oceniono na ile reprezentatywne są przyjęte w analizie dane. Wyniki badań skuteczności niektórych klasyfikatorów wyeliminowały poziom strat pakietów jako czynnik istotnie wpływający na jakość przekazu strumieni danych. Wniosek ten jest mocno kontrowersyjny, gdyż poziom strat pakietów znaczącym stopniu degraduje jakość przekazu.

3 Ocena zastosowanego piśmiennictwa

Rozprawa zawiera 224 odwołania do publikacji, artykułów konferencyjnych, dokumentów standaryzacyjnych i specyfikacji. Analizę literatury głównie zamieszczono w rozdziale 1 i 2. Pomimo tak znaczącego zbioru odwołań, w wielu przypadkach brakuje ich głębszej analizy i przede wszystkim przedstawienia wniosków wynikających z badań przedstawionych w cytowanych pracach. Ponadto w cytowanym zbiorze zabrakło analizy stanu badań dotyczących metod QoS rutingu, które to metody są ściśle związane z tematyką pracy. Również, w mojej ocenie, w pracy brakuje rozdziału z analizą literatury dotyczącej klasyfikatorów bazujących na algorytmach uczenia maszynowego. W szczególności brak jest rozdziału przedstawiającego te metody oraz oceny dotyczącej wyboru

takiego a nie innego zbioru klasyfikatorów. Analiza ta jest ważna z punktu widzenia projektu klasyfikatorów przedstawionego w rozdziale 4.4.

Podsumowując, przedstawiona przez autora analiza literatury, pomimo odwołań do znaczącej liczby 224 prac, nie jest w pełni wyczerpująca i zawiera pewne braki. Istotny niedosyt pozostaje ze względu na brak podsumowania wniosków z analizy zbliżonych rozwiązań dotyczących poszczególnych obszarów tematycznych rozprawy. Wnioski takie powinny stanowić motywację dla opracowania proponowanego rozwiązania. Mimo tych braków, należy stwierdzić, że autor wykazał się dobrą znajomością tematyki pracy.

4 Ocena zastosowanych metod badawczych

Postawioną w rozprawie tezę udowodniono w sposób eksperymentalny przez implementację systemu „Pay & Require” w dwóch środowiskach, tj. środowisku bazującym na ruterach programowych Vyatta (emulator sieci) oraz w środowisku symulacyjnym zbudowanym wykorzystując symulator NS3. Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że jest możliwe różnicowanie jakości obsługi przez odpowiedni dobór ścieżek przekazu. Zamieszczone w rozprawie wyniki ilustrują tę cechę systemu. Zastosowanie metod symulacyjnych, a także implementacja modelu systemu bazując na routerze programowym Vyatta, jest właściwym podejściem, które nie budzi żadnych zastrzeżeń. Natomiast samo przeprowadzenie eksperymentów, w szczególności brak ich szczegółowego opisu, brak opisu warunków ruchowych, przyjęcie w eksperymentach innych metryk jakości niż te zawarte w opisie systemu, a także brak dogłębnej analizy wyników, zwłaszcza w przypadkach uzyskania znaczących rozbieżności w eksperymentach symulacyjnych w porównaniu do eksperymentów z użyciem emulatora, budzi wątpliwości co do rzetelności przeprowadzenia badań (lub co najmniej rzetelności ich udokumentowania). Wątpliwości te nie podważają wyrażonej tezy, tzn., że jest możliwe różnicowanie jakości przez odpowiedni dobór dróg przekazu, natomiast mogą wpływać na ocenę efektywności proponowanego systemu.

Druga moja wątpliwość, dotyczy oceny reprezentatywności danych wykorzystywanych w opracowanym modelu QoE. Należy zwrócić uwagę, że wpływ parametrów charakteryzujących przekaz pakietów na jakość postrzeganą przez użytkownika jest silnie uzależniony od rodzaju wykorzystywanej aplikacji. Przykładowo, charakterystyki opóźnienia przekazu pakietów mają istotne znaczenie w przypadku aplikacji interaktywnych, natomiast w przypadku aplikacji niewymagających pracy w czasie zbliżonym do rzeczywistego mogą mieć marginalne znaczenie. Z tego względu rozważanie odwzorowania wartości parametrów obsługi QoS na wartości jakości postrzeganej przez użytkownika bez uwzględnienia danej klasy usług może budzić wątpliwości co do jej praktycznego zastosowania (oczywiście może być rozważane jako abstrakcyjny problem dopasowania odpowiedniego klasyfikatora do zbioru danych).

W mojej ocenie, sposób przeprowadzenia oceny klasyfikatorów bazujących na algorytmach uczenia maszynowego, a także oceny efektywności zaproponowanych sześciu algorytmów nie budzi wątpliwości.

Podsumowując uważam, że postawiony w rozprawie problem został rozwiązany przy użyciu właściwych do tego metod, jednakże w części przeprowadzonych badań pozostają pewne zastrzeżenia, co do których mam prośbę o odniesienie się przez Doktoranta.

5 Ocena osiągniętych wyników badań

Za główne osiągnięcia rozprawy uznaję:

- 1) Opracowanie koncepcji systemu sterowania „Pay & Require” dla sieci pakietowych, który umożliwi różnicowanie jakości obsługi strumieni danych za pomocą wyboru odpowiedniej drogi przekazu danych. Wybór tej drogi jest realizowany na podstawie mechanizmu dynamicznej taryfikacji bazującej na metodach aukcyjnych, który uwzględni wymagania użytkownika. Należy podkreślić, iż koncepcja system „Pay & Require” jest interesująca i potencjalnie może mieć zastosowanie w przypadku nowych usług oferowanych użytkownikom.
- 2) Opracowanie algorytmów klasyfikacji zbiorów charakterystyk przekazu pakietów do skończonego zbioru klas jakości, przy wykorzystaniu metod uczenia maszynowego. Opracowane metody są wartościowe i mogą mieć szeroki zakres zastosowań. W szczególności, opracowane metody mogą być użyteczne w obszarze badań nad nowymi metrykami i metodami obiektywnej oceny QoE opracowywanymi dla nowych aplikacji. Zastosowanie metod uczenia maszynowego jest obecnie postrzegane jako perspektywicznie rozwiązanie o znaczącym potencjale ze względu na fakt, iż ogromną złożoność czynników wpływających na ocenę QoE.

6 Jakie są wady i słabe strony rozprawy?

Do słabych stron rozprawy zaliczam:

- 1) Brak pełnego opisu mechanizmów i algorytmów zastosowanych w systemie „Pay & Require”. W szczególności zastosowanych metod monitorowania sieci, algorytmów decyzyjnych dot. wyboru ścieżki przekazu danych.
- 2) Ograniczony zakres i sposób przeprowadzenia i udokumentowania badań systemu „Pay & Require”. Jak już wcześniej wspomniałem w eksperymentach przyjęto arbitralnie wiele założeń i nie przeprowadzono dyskusji na temat ich wpływu na uzyskane wyniki. Ponadto, przyjęcie w eksperymentach innego zestawu metryk jakości niż w opisie systemu jest dość zaskakujące. W przedstawionym zakresie badań brakuje moim zdaniem oceny zachowania systemu w dynamicznie zmieniających się warunkach ruchowych oraz oceny skalowalności systemu.
- 3) Ograniczenie oceny efektywności opracowanych klasyfikatorów do jednego zbioru danych, które zostały zebrane w ramach prac nad przedstawionym modelem QoE. Niewątpliwie rozszerzenie zakresu badań na wiele zbiorów danych byłoby wartościowe z punktu widzenia oceny wiarygodności uzyskanych wniosków. W szczególności należy zwrócić uwagę, że istnieją uznane modele empiryczne, np. E-model dla usług VoIP, które umożliwiają odwzorowanie parametrów jakości QoS w QoE. Wykorzystanie tych modeli jako poziomu odniesienia wydaje się wartościowym.
- 4) Brak pełnej integracji opracowanych elementów systemu w środowisku symulacyjnym, a także opracowanym emulatorze sieci. Po lekturze rozprawy odnoszę wrażenie, że opracowane klasyfikatory bazujące na algorytmach uczenia maszynowego oraz przedstawiony system aukcyjny nie zostały w pełni zintegrowane z przedstawionym systemem „Pay & Require”. Być może mam nieco mylne wrażenie, ale w rozprawie zabrakło całościowych badań przedstawiających zysk jaki można uzyskać w systemie dzięki zastosowaniu opracowanego

klasyfikatora bazującego na algorytmach uczenia maszynowego w porównaniu do statycznej metody klasyfikacji strumieni.

- 5) Brak zastosowanie metod analitycznych do oceny efektywności działania systemu. Opracowany system „Pay & Require” wykorzystuje zależności pomiędzy podstawowymi metrykami QoS dla efektywnego zarządzania rozpyłem ruchu w sieci. Należy zwrócić uwagę, iż istnieje wiele modeli analitycznych dotyczących analizy sieci jako systemu sieci kolejek, które mogłyby być wykorzystane w rozprawie (w szczególności do analizy zależności pomiędzy parametrami jakości obsługi, takimi jak opóźnienie, zmienność opóźnienia, poziom strat pakietów).
- 6) Pewnie uchybienia językowe i redakcyjne:
 - a. Teza rozprawy dotyczy „różnicowania jakości usługi” w tekście rozprawy autor często mówi o „gwarancjach jakości” a są to jednak różne pojęcia;
 - b. Słowo „transmisja” jest błędnie używane zamiast „przekaz”;
 - c. Słowo „priorytetyzacja” jest błędnie używane w znaczeniu różnicowanie;
 - d. Słowo „mapowanie” użyte zamiast „odwzorowanie”

7 Czy rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego?

Tak, w mojej ocenie oryginalny dorobek obejmuje:

- 1) Opracowanie koncepcji systemu sterowania „Pay & Require” dla sieci pakietowych, który umożliwi różnicowanie jakości obsługi strumieni danych za pomocą wyboru odpowiedniej drogi przekazu danych. Wybór tej drogi jest realizowany na podstawie mechanizmu dynamicznej taryfikacji bazującej na metodach aukcyjnych, który uwzględnia wymagania użytkownika. Należy podkreślić, iż koncepcja system „Pay & Require” jest interesująca i potencjalnie może mieć zastosowanie w przypadku nowych usług oferowanych użytkownikom.
- 2) Opracowanie algorytmów klasyfikacji zbiorów charakterystyk przekazu pakietów do skończonego zbioru klas jakości, przy wykorzystaniu metod uczenia maszynowego. Opracowane metody są wartościowe i mogą mieć szeroki zakres zastosowań.

O znaczeniu uzyskanych wyników świadczą też publikacje autora w renomowanych czasopismach oraz krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych, spośród których należy wyróżnić publikacje w „*International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*” (100 pkt MEiN), „*Sensors*” (100 pkt. MEiN), oraz materiałach międzynarodowych konferencji CCGRID'20 (140 pkt. MEiN).

8 Czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej?

Tak, chociaż pewne wątpliwości budzi wspomniany sposób prowadzenia i dokumentowania przeprowadzonych badań.

9 Podsumowanie

Opracowany system sterowania „Pay & Require” dla sieci pakietowych umożliwiający różnicowanie jakości obsługi strumieni, a także opracowane metody klasyfikacji bazujące na algorytmach uczenia maszynowego są oryginalne, wartościowe i mogą mieć praktyczne zastosowanie w przyszłych sieciach telekomunikacyjnych. Wyniki prac zostały opublikowane w międzynarodowych czasopismach i konferencjach znajdujących się na liście MEiN. Z tego względu oceniam, że **osiągnięcia autora rozprawy spełniają warunki stawiane kandydatom ubiegającym się o stopień doktora** w odnośnych ustawach i po spełnieniu innych warunków formalnych, wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Andrzej B. Ben