

Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Warszawa, 21 listopada 2016 r.

D z i e k a n a t

Uprzejmie informuję, że na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej odbędzie się w dniu 6 grudnia 2016 r. publiczna obrona rozprawy doktorskiej

mgr inż. Macieja Zbierskiego

temat: „Adaptive Byzantine Fault-Tolerant Replication Protocols”

promotor – prof. dr hab. inż. Janusz Sosnowski z Politechniki Warszawskiej

recenzenci:

prof. dr hab. inż. Bogdan Wiszniewski z Politechniki Gdańskiej

prof. dr hab. inż. Franciszek Seredyński z Uniwersytetu Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie

Rozprawa jest do wglądu w Bibliotece Głównej Politechniki Warszawskiej. Obrona odbędzie się w dniu 6 grudnia 2016 r. w sali 116 na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych – Gmach im. Janusza Groszkowskiego, Warszawa, ul. Nowowiejska 15/19; początek godz. 11.00.

Po adresem: www.elka.pw.edu.pl/Wydzial/Rada-Wydzialu/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje zapewniony jest na stronie Wydziału dostęp do tekstów streszczenia rozprawy i recenzji, jak również do tekstu rozprawy umieszczonej w Bazie Wiedzy Politechniki Warszawskiej.

Dziekan



prof. dr hab. inż. Krzysztof Zaremba

Autor: mgr inż. Maciej Zbierski

Promotor: prof. dr hab. inż. Janusz Sosnowski

Temat: Adaptive Byzantine Fault-Tolerant Replication Protocols (Adaptacyjne protokoły replikacji tolerujące błędy bizantyjskie)

Streszczenie

Replikacja tolerująca błędy bizantyjskie jest metodą pozwalającą na implementację rozproszonych usług sieciowych zachowujących dostępność nawet w trakcie arbitralnej awarii podzbioru serwerów, na których taka usługa jest rozlokowana. Mimo iż literatura zawiera liczne przykłady protokołów replikacji tolerujących błędy bizantyjskie, praktycznie żadne istniejące rozwiązanie nie jest w stanie zapewnić akceptowalnej wydajności nie podlegającej jednocześnie wpływowi zmiennych warunków panujących w środowisku systemu rozproszonego. Niniejsza rozprawa analizuje w jakim stopniu wprowadzenie koncepcji adaptacyjności do protokołów replikacji tolerujących błędy bizantyjskie jest w stanie wpłynąć na poprawę ich wydajności i stabilności. W przeciwieństwie do poprzednich podejść, systemy przedstawiane i analizowane w niniejszej rozprawie zmieniają swoje zachowanie, parametry konfiguracyjne bądź tryby pracy, dostosowując się do zaobserwowanych zmian w środowisku systemu rozproszonego, bazując na przykład na właściwościach żądań otrzymywanych od klientów, obciążeniu serwerów, czy też rodzaju występujących błędów. Dodatkowo, rozprawa proponuje nową, uniwersalną technikę konstruowania adaptacyjnych systemów opartych o tradycyjne protokoły replikacji tolerujące błędy bizantyjskie, pozwalającą na tworzenie rozwiązań potrafiących dynamicznie dopasować się do warunków panujących w środowisku systemu rozproszonego.

prof. dr hab. inż. Bogdan Wiszniewski
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki

*RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK
INFORMACYJNYCH POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ*

Tytuł rozprawy: Adaptive Byzantine Fault-Tolerant Replication Protocols

Autor rozprawy: mgr inż. Maciej Zbierski

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

Rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Zbierskiego podejmuje problem konstruowania systemów rozproszonych, dostarczających usług sieciowych tolerujących błędy bizantyjskie z wykorzystaniem protokołu replikacji stanu. Tolerowanie tych błędów rozumiane jest w Rozprawie jako zdolność do zapewnienia przez system dostępności i niezawodności realizowanych usług. Doktorant skupił się w swoich badaniach na zagadnieniu zapewniania zadanego poziomu wydajności obliczeń takich systemów, w tym na dwóch determinujących ten atrybut jakości charakterystykach - skalowalności, zarówno związanej z możliwością zwiększania przez poszczególne węzły swoich zasobów pamięciowych i obliczeniowych, jak i zwiększania liczby węzłów w systemie w odpowiedzi na wzrastające obciążenie systemu danymi, a także stabilności, związanej z utrzymaniem zadanej wydajności przy zmieniających się parametrach konfiguracyjnych środowisk wykonawczych poszczególnych węzłów. Wychodząc z tych dwóch przesłanek zaproponował rozszerzenie protokołu replikacji o mechanizm adaptacji do zmiennych warunków wykonywania obliczeń. Związana z tym założeniem teza Rozprawy została sformułowana przez Doktoranta jasno i trafnie. Wywód prowadzony jest klarownie, nadając Rozprawie charakter jednoznacznie doświadczalno-projektowy.

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?*

Lektura Rozprawy nie pozostawia żadnych wątpliwości co do wiedzy Doktoranta w dziedzinie systemów przetwarzania rozproszonego, w szczególności w zakresie obliczeń niezawodnych, oceny jakości systemów obliczeniowych oraz zapewniania wydajności i wiarygodności systemów tolerujących błędy. Rozdział 2. określa precyzyjnie punkt wyjścia do szczegółowych rozważań w następnych rozdziałach Rozprawy, obejmując jednocześnie syntetyczny przegląd znanych w literaturze światowej rozwiązań stosowanych w systemach tolerujących błędy bizantyjskie, jak i ogólną charakterystykę rozwiązań zaproponowanych przez Doktoranta. W kolejnych rozdziałach 3., 4., 5. i 6., Doktorant przedstawia systematycznie wszystkie te rozwiązania w sposób bardzo szczegółowy i komentuje swoje poszczególne decyzje projektowe

odwołaniami do kluczowych pozycji literatury. Komentarze te świadczą o dobrej znajomości treści cytowanych publikacji i co ważniejsze mają charakter polemiczny. Doktorant przedstawia przekonujące argumenty na rzecz nowatorstwa swoich rozwiązań proponowanych w Rozprawie. Argumentacja ta jest w każdym ze wspomnianych rozdziałów konsekwentnie wspierana wynikami uzyskanymi przez Doktoranta w wyniku eksperymentalnej oceny porównawczej metod znanych i cytowanych z własnymi, proponowanymi w Rozprawie. Wszystkie sformułowane na tej podstawie wnioski są jasne i przekonujące. Lista cytowanej literatury liczy łącznie 129 aktualnych pozycji (w tym 5 pozycji własnych Doktoranta) i obejmuje zarówno najbardziej opiniotwórcze czasopisma naukowe typu „transactions” oraz materiały kluczowych konferencji z zakresu bezpieczeństwa i niezawodności systemów informatycznych (np. USENIX), jak i raporty techniczne czy publikacje internetowe.

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

Doktorant zaprojektował cztery oryginalne mechanizmy zapewniania wydajności obliczeń rozproszonych w systemach wykorzystujących protokoły replikacji zapewniające tolerowanie błędów bizantyjskich, które łącznie wprowadzają nową jakość do praktyki projektowania systemów rozproszonych tolerujących błędy bizantyjskie.

Pierwszy mechanizm wykorzystuje adaptacyjny algorytm optymalnego grupowania żądań klientów ze względu na czas niezbędny do wykonania operacji kryptograficznych związanych z danym protokołem replikacji. Możliwość wykorzystania przez ten mechanizm różnych znanych (lub nowych, opracowanych w przyszłości) algorytmów przewidywania intensywności ruchu żądań pozwala projektować systemy tolerujące błędy bizantyjskie, których wydajność albo nie powinna maleć, albo maleć, ale umiarkowanie i w sposób przewidywalny - stopniowo w miarę wzrostu liczby wadliwych węzłów.

Drugi mechanizm dotyczy wyznaczania prawidłowej kolejności obsługi żądań klientów przekazywanych do węzłów wykonawczych. Dzięki zainstalowaniu tego mechanizmu zarówno na węzłach uzgadniających jak i węzłach wykonawczych Doktorantowi udało się zredukować liczbę niezbędnych rund rozsyłania komunikatów pomiędzy węzłami o jeden.

Trzeci mechanizm umożliwia równoległą obsługę żądań klientów dzięki zastosowaniu hierarchicznej dekompozycji stanu obliczeń systemu na rozłączne części stanu przypisane do poszczególnych grup węzłów wykonawczych wydzielonych z zasobów obliczeniowych systemu. Każda część stanu składa się z niepodzielnych jednostek do których podczas obliczeń mogą odwoływać się węzły wykonawcze ze związanej z nią grupą węzłów. Dzięki temu, że jednostki (stanu) mogą w trakcie obliczeń zmieniać swojego przypisania do poszczególnych części stanu i migrować między grupami węzłów wykonawczych, możliwe jest dynamiczne równoważenie obciążenia całego systemu. Doktorant zakłada, że przy grupowaniu węzłów wykonawczych uda się zawrzeć w każdej grupie węzły o możliwie podobnych charakterystykach wykonawczych (mocy procesora/ów i wielkości pamięci). W połączeniu z możliwością migracji jednostek stanu między grupami węzłów o różnych charakterystykach mechanizm ten zapewnia protokołowi replikacji skalowalność równocześnie w poziomie i w pionie. Zaprojektowany przez Doktoranta mechanizm przewiduje oprócz węzłów wykonawczych wykorzystanie węzłów diagnostycznych, których zadaniem jest weryfikacja czy dla każdego replikowanego obliczenia zwracana przez węzły wykonawcze liczba wyników przekracza minimalną wartość gwarantujących quorum. W szczególnych przypadkach węzły diagnostyczne mogą przejąć rolę węzłów wykonawczych. Mechanizm ten oceniam jako najbardziej pomysłowy ze wszystkich czterech przedstawionych w Rozprawie.

Wreszcie czwarty mechanizm umożliwia automatyczny wybór protokołu replikacji z pewnej predefiniowanej listy protokołów w celu zapewnienia systemowi utrzymania odpowiedniego poziomu wydajności, niezależnie od ujawniających się w nim uszkodzeń węzłów. Wybór protokołu dokonywany jest oparciu o dodatkowy moduł nadzorca, wykrywający zdarzenia (zmiany węzłów odpowiedzialnych za sekwencjonowanie żądań, występowanie komunikatów z uszkodzonym kodem uwierzytelniania) i mierzący parametry (zliczanie określonych zdarzeń, pomiar długości przedziałów czasu upływającego między zdarzeniami), który funkcjonuje jak multiplekser przechwytyjący komunikaty i przekierowujący je do odpowiednich instancji protokołów replikacji. W Rozprawie opisano realizację tego mechanizmu w formie proof-of-concept - prototypu funkcjonalnego, wykorzystującego trzy podstawowe protokoły replikacji znane w literaturze. W zrealizowanym prototypie klienci markują obliczenia wysyłając zapytania do węzłów systemu z różną intensywnością. Każdy z uwzględnionych przez Doktoranta protokołów z osobna jest zdolny zapewnić optymalny poziom wydajności tylko dla pewnej kombinacji wspomnianych wcześniej zdarzeń i wartości parametrów. Wyniki oceny eksperymentalnej tego mechanizmu zaprezentowane w Rozprawie potwierdzają słuszność przyjętych przez Doktoranta założeń i stanowią swoisty wzorzec projektowy dla tego typu rozwiązań w docelowych systemach.

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?*

Do osiągnięć opisanych w Rozprawie zaliczam:

- A. Propozycję protokołu replikacji tolerującego błędy bizantyjskie wykorzystującego hierarchiczny model podziału replikowanego stanu i pozwalającego na jednoczesne osiągnięcie skalowalności pionowej i poziomej.
- B. Opracowanie algorytmu adaptacyjnego grupowania żądań klientów, umożliwiającego wykorzystanie dowolnych protokołów replikacji tolerujących błędy bizantyjskie i zapewniającego wyższą wydajność replikacji niż algorytmy grupowania żądań opisywane w literaturze.
- C. Propozycję nowej techniki konstruowania adaptacyjnych systemów tolerujących błędy bizantyjskie i zademonstrowanie jej w praktyce do utworzenia odpowiedniego protokołu replikacji, zapewniającego równocześnie wysoką wydajność w środowiskach poprawnych i dostępność replikowanej usługi w obecności złośliwych klientów.

Wymienione wyżej osiągnięcia stanowią oryginalny dorobek Doktoranta, udokumentowany (oprócz recenzowanej Rozprawy) w pięciu samodzielnych publikacjach w międzynarodowych wydawnictwach zbiorowych. W odniesieniu do aktualnego stanu wiedzy opisywanej w literaturze światowej z zakresu zagadnień tolerowania błędów bizantyjskich zawierają one wyraźnie elementy nowatorskie, szczególnie w aspekcie technik adaptacyjnych.

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

Rozprawa została napisana w języku angielskim, a w jej tekście znalazłem niewielką liczbę błędów przestankowych, literówek i błędów gramatycznych, które jednak nie wpływają na zrozumiałość prowadzonego wywodu. Układ i sposób redakcji rozprawy, wydanej w formie

zeszytu naukowego, zamieszczone w niej wykresy, diagramy, schematy, listingi i tabele są czytelne. Dodatkowo ich zrozumiałość podwyższają komentarze i omówienia słowne, konsekwentne umieszczane przez Doktoranta w tekście Rozprawy. Pewnym niewielkim mankamentem szaty graficznej Rozprawy może być brak konsekwencji w posługiwaniu się kolorami w odniesieniu do niektórych rysunków. Na przykład, diagram na rysunku 2.1 jest kolorowy, a podobne do niego diagramy na rysunkach 4.2-4.4 są utrzymane w odcieniach szarości. W przypadku wydania Rozprawy w postaci zeszytów naukowych warto było zadbać o jednolitość ich formy. W zeszycie brakuje także wykazu symboli i skrótów, co przy dłuższych wywodach niekiedy utrudnia czytanie. Główny tekst Rozprawy poprzedza krótkie streszczenie w języku polskim, które prawidłowo odzwierciedla treść części angielskojęzycznej. Doktorant prowadzi wywód sprawnie, wykazując się sporą erudycją. Gdziekolwiek jednak ta erudycja utrudnia nieco lekturę, ze względu na długie tłumaczenia bardziej zawyłych kwestii, np. w opisie wykorzystania identyfikatorów podczas migracji przedstawionym na str. 112 występuje zwrot „empty ownership change request”, niezrozumiały w kontekście zawartych na tej stronie objaśnień. Rozdziały 3., 4., 5. i 6., w których przedstawione zostały poszczególne rozwiązania stanowiące osiągnięcia wymienione w p.4 tej recenzji, skonstruowane zostały wg jednolitego schematu: przesłanki (tło, założenia), szczegóły proponowanego rozwiązania, ocena eksperymentalna i podsumowanie, z rozważaniami ewentualnych opcji i licznymi odwołaniami do literatury światowej, co z kolei ułatwia czytanie Rozprawy.

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

Niedociągnięcia redakcyjne Rozprawy przedstawione w poprzednim punkcie tej recenzji nie są znaczące z punktu widzenia ostatecznego wyniku osiągniętego przez Doktoranta. Pewien niedosyt budzi natomiast to, że w swoich badaniach Doktorant poprzestał na prototypie funkcjonalnym i zadowolił się „proof-of-concept”, a nie posunął się dalej w kierunku walidacji swojego rozwiązania w zastosowaniu do jakiegoś rzeczywistego problemu obliczeniowego. Postulowana aplikacja mogłaby posłużyć jako studium przypadku do zilustrowania jak należy rozwiązywać pewne kwestie szczegółowe, zasygnalizowane w Rozprawie jedynie w formie wskazówek oraz do wskazania docelowej klasy zastosowań metody projektowania systemów tolerujących błędy bizantyjskie opracowanej przez Doktoranta:

- A. dla wspomnianych kwestii szczegółowych konieczne jest przedyskutowanie na przykładzie konkretnego zastosowania sposobów skutecznego strojenia parametrów modelu tworzenia plików wsadowych (str. 47-48), ilościowych kryteriów doboru serwerów do grupy węzłów wykonawczych o charakterystykach wydajnościowych uznanych za zbliżone (str. 110) i powiązanego z nimi zagadnienia optymalnego rozmieszczania na osi czasu punktów synchronizacji (str. 111) oraz procesu projektowania polityki migracji (str. 112-113);
- B. w odniesieniu do docelowej klasy zastosowań metody Doktoranta umiejętnie dobrany przykład jej zastosowania powinien lepiej uwypuklić jej zalety. W przypadku wielkości systemu obliczeniowego i dostępnej nadmiarowości jednostek przetwarzających rzędu od kilku do kilkunastu (co miało miejsce w Rozprawie) być może nie byłoby potrzeby wprowadzania takiego modelu adaptacyjnego jak zaproponowany w Rozprawie, ze względu podwyższone reżimy niezawodności hardware'u wynikające z innych wymagań, np. w przypadku realizacji systemu wbudowanego w awionice samolotu bojowego lub aparaturze pokładowej satelity. Natomiast w przypadku realizacji obliczeń większej skali, z udziałem setek lub tysięcy węzłów obliczeniowych, np. w oparciu o

chmurę obliczeniową czy wolontariat obliczeniowy, albo w systemach o mniejszej liczbie węzłów, ale o wątpliwej niezawodności, jak np. w obliczeniach mobilnych w oparciu o sieci ad-hoc, podejście adaptacyjne opracowane przez Doktoranta miałyby w mojej ocenie poważne zalety.

Reasumując, interesuje mnie jak należy przeprowadzić proces strojenia mechanizmów opracowanych w Rozprawie pod kątem zadanych wymagań wydajnościowych aplikacji na przykładzie wybranego zastosowania i z uwzględnieniem realiów konkretnego środowiska wykonawczego, w związku z czym proszę o przedstawienie takiego przykładu na publicznej obronie.

7. *Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?*

Problematyka badawcza recenzowanej rozprawy doktorskiej wpisuje się w aktualne trendy rozwoju społeczeństwa informacyjnego, w coraz większym stopniu wykorzystującego rozmaite usługi obliczeniowe dostarczane zdalnie przez komercyjnych lub publicznych dostawców. Wspólnym mianownikiem tych usług jest zapewnienie im skalowalności i dostępności, z reguły trudne do osiągnięcia w systemach rozproszonych, składających z dowolnie wielu, często heterogenicznych jednostek, angażowanych do pracy w trybie ad-hoc. W przypadku klastrów obliczeniowych na pierwszy plan wysuwa się niewątpliwie problem skalowalności, zarówno poziomej jak i pionowej, rozważanych w Rozprawie. W przypadku chmur obliczeniowych do problemu skalowalności dochodzi problem zapewniania dostępności usługi, której poszczególne komponenty wykonawcze mogą być dzięki wirtualizacji uruchamiane pod różnymi systemami operacyjnymi. Wynikające z tego zróżnicowania błędy, ujawniające się sporadycznie w kodzie niektórych komponentów mogą prowadzić do wystąpienia w realizowanej usłudze błędów bizantyjskich. Dla farm serwerów, zróżnicowanie warunków wykonania poszczególnych komponentów usługi obliczeniowej może być jeszcze większe (paradoksalnie także w przypadku botnetów stosowanych do działań przestępczych), zatem zapewnienie dostępności usługi będzie jeszcze bardziej wymagające. Propozycja techniki konstruowania adaptacyjnych systemów tolerujących błędy bizantyjskie, z zachowaniem odpowiednio wysokiej wydajności i dostępności ich usług przedstawiona w Rozprawie jest w świetle scharakteryzowanych wyżej trendów wartościowa i przydatna.

8. *Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:*

Uwagi krytyczne wyrażone w p. 5. i 6. recenzji w żadnym stopniu nie wpływają na moją ostatecznie pozytywną ocenę recenzowanej Rozprawy, którą uznaję za spełniającą wymagania stawiane w Ustawie rozprawom doktorskim i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

B. Wiśniewski

prof. dr hab. inż. Bogdan Wiszniewski

Prof. dr hab. inż. Franciszek Sereżyński
Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie
Instytut Informatyki
Wydział Matematyczno-Przyrodniczy. Szkoła Nauk Ścisłych
Ul. Wóycickiego 1/3, 01-938 Warszawa

Warszawa, 30.09.2016

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY
WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

Tytuł rozprawy: Adaptive Fault-Tolerant Replication Protocols

Autor rozprawy: mgr inż. Maciej Zbierski

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

Przedmiotem rozprawy doktorskiej są zagadnienia związane z poprawnym funkcjonowaniem złożonych systemów rozproszonych oferujących rozproszone usługi sieciowe. Szczegółowym zagadnieniem, na którym skupił się doktorant są protokoły replikacji tolerujące błędy bizantyjskie.

Na podstawie analizy aktualnego stanu literatury autor stwierdza, że istniejące rozwiązania w zakresie protokołów replikacji tolerujących błędy bizantyjskie mają poważne wady. Wśród nich wskazuje na takie wady jak niedostateczna skalowalność jak też ograniczona wydajność, co ujawnia się szczególnie w warunkach zmian środowiska, w tym zmian parametrów obciążenia, liczbą klientów, rozmiarem zadań, itp.

Doktorant stawia tezę, że wprowadzenie mechanizmów adaptacji i opracowanie z ich użyciem nowych adaptacyjnych protokołów replikacji tolerujących błędy bizantyjskie przyczyni się do uzyskania rozwiązań przewyższających jakościowo istniejące protokoły replikacji, w szczególności w warunkach dużych obciążeń i zmieniających się warunków środowiskowych.

Rozprawa ma charakter teoretyczno-doświadczalny, a uzyskane wyniki potwierdzają tezę rozprawy.

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 ?

W rozdz. 2 rozprawy doktorant przeprowadził wyczerpującą analizę literaturową aktualnego stanu badań prowadzonych na świecie w zakresie protokołów replikacji tolerujących błędy bizantyjskie. Literatura przedmiotu obejmuje 129 pozycji literaturowych. Prawie wszystkie cytowane artykuły, za wyjątkiem 4 publikacji, to artykuły opublikowane w latach 2000-2016. Świadczy to dobitnie o bardzo dobrej znajomości przez doktoranta najnowszej literatury przedmiotu i zgłębieniu przez niego istoty problemu.

Analiza literaturowa problemu poprzedzona jest przedstawieniem podstawowych pojęć związanych z techniką replikacji tolerujących błędy bizantyjskie, jak również przedstawiony został model systemu rozproszonego, który będzie przedmiotem dalszych badań.

Analiza literaturowa przeprowadzona w dalszej części rozdziału skupia się, między innymi, na takich zagadnieniach jak redukcja kosztów replikacji, optymalizacja grupowania żądań, kwestia separacji jako środka zwiększającego skalowalność. Każde zagadnienie jest szeroko dyskutowane z perspektywy historycznej tworzonej przez kolejne pojawiające się w czasie publikacje i ma na celu odnalezienie głównych ograniczeń limitujących pracę współczesnych protokołów replikacji tolerujących błędy bizantyjskie. Przeprowadzona analiza literaturowa umożliwi sformułowanie w końcu rozdz. w 2 podstawowych koncepcji i kierunków badań będących przedmiotem rozprawy, których wyniki będą przedstawione w kolejnych rozdziałach.

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

Jak wspomniano już wcześniej, myślą przewodnią rozprawy jest wprowadzenie i wykorzystanie dla celów konstrukcji protokołów replikacji tolerujących błędy bizantyjskie pojęcia adaptacji. Główne rozdziały rozprawy realizujące ten postulat to rozdziały 3, 4, 5 i 6. To w nich zostały przedstawione najważniejsze oryginalne wyniki badań.

Rozdz. 3 rozprawy ma charakter wstępnych badań, gdzie doktorant proponuje adaptacyjny algorytm grupowania żądań klientów użyteczny dla celów konstrukcji protokołów replikacji tolerujących błędy bizantyjskie. Algorytm umożliwia kontrolę rozmiaru grupy żądań w taki sposób, aby minimalizować koszt obliczeniowy niezbędnych operacji kryptograficznych związanych z przetwarzaniem żądań klientów. Algorytm ten jest następnie używany w kolejnych rozdziałach rozprawy.

W rozdz. 4 rozprawy doktorant rozwiązuje problem związany z tzw. horyzontalną skalowalnością, który jest jednym z głównych problemów ograniczających skalowalność współczesnych protokołów replikacji tolerujących błędy bizantyjskie. Doktorant proponuje oryginalną rozproszoną usługę grupowania żądań, której daje nazwę *Otonaru*, i która umożliwi efektywną komunikacyjnie separację faz uzgodnienia i wykonania i pozwala na

skonstruowanie protokołu replikacji tolerującego błędy bizantyjskie charakteryzującego się znacznie wyższą efektywnością niż klasyczne protokoły.

W rozdz. 5 doktorant rozwiązuje drugi z wcześniej sformułowanych problemów charakteryzujących współczesne protokoły replikacji tolerujące błędy bizantyjskie i związany z tym, że te protokoły nie są w stanie zapewnić jednoczesnej skalowalności horyzontalnej i poziomej. W tym celu doktorant proponuje nowy oryginalny skalowalny protokół replikacji tolerujący błędy bizantyjskie, protokół *Apex*, który nie posiada tej wady. Proponowane rozwiązanie opiera się na wprowadzonym przez doktoranta hierarchicznym modelu podziału replikowanego stanu i zapewnia osiągnięcie celu bez konieczności wydłużania czasu przetwarzania żądań klientów.

Rozdz. 6 jest finalnym rozdziałem badań prowadzonych w ramach rozprawy doktorskiej i proponuje nową technikę konstruowania adaptacyjnych systemów tolerujących błędy bizantyjskie. Zaproponowana została oryginalna metoda *Supr*, która upraszcza tworzenie adaptacyjnych protokołów replikacji tolerującego błędy bizantyjskie poprzez złożenie wielu niezależnych od siebie protokołów replikacji, z których każdy jest dopasowany do innych warunków istniejących w środowisku systemu rozproszonego, a moduł nadzorcy monitorujący parametry środowiska wybiera z dostępnych protokołów ten najbardziej odpowiedni.

W ten sposób doktorant rozwiązał postawione zadania, a zastosowane metody i założenia wydają się być właściwe.

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 ?

W rozprawie osiągnięto szereg nowych istotnych wyników teoretycznych jak i praktycznych związanych z adaptacyjnymi protokołami replikacji tolerującymi błędy bizantyjskie i mającymi duże znaczenie dla problematyki systemów rozproszonych. Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć przedstawionych w rozprawie można zaliczyć:

- Opracowanie oraz eksperymentalna weryfikacja adaptacyjnego algorytmu grupowania żądań klientów, zorientowanego na minimalizację kosztów kryptograficznych przetwarzania żądań i umożliwiającego współpracę z protokołami replikacji tolerującymi błędy bizantyjskie
- Opracowanie oraz eksperymentalna weryfikacja oryginalnej rozproszonej usługi grupowania żądań *Otonaru* umożliwiająca tworzenie efektywnych protokołów replikacji tolerującymi błędy bizantyjskie
- Zaproponowanie nowego oryginalnego protokołu replikacji *Apex* tolerującego błędy bizantyjskie charakteryzującego się skalowalnością zarówno horyzontalną jak też poziomą oraz eksperymentalna weryfikacja protokołu
- Zaproponowanie nowej uniwersalnej metody *Supr* umożliwiającej konstruowanie adaptacyjnych protokołów tolerujących błędy bizantyjskie oraz eksperymentalna weryfikacja metody z użyciem wygenerowanego protokołu *Dali*.

Rozprawa ta jest prawdopodobnie pierwszym opracowaniem, które w sposób kompleksowy proponuje szereg nowych oryginalnych rozwiązań wykorzystujących mechanizmy adaptacji w protokołach replikacji tolerujących błędy bizantyjskie.

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

Rozprawa została napisana w j. angielskim. Jest starannie przygotowana zarówno pod względem językowym jak też edytorskim. Jedyne uchybienie językowe, które niestety wielokrotnie powtarza się w rozprawie, poczynając od str. 11, to sposób używania słowa „such”, np. „such approach”, „Such behavior” zamiast odpowiednio „such an approach”, „Such a behavior”.

Autor wykazał się dużą umiejętnością przekazywania uzyskanych wyników w sposób jasny i czytelny. Duża liczba starannie wykonanych rysunków i wykresów ułatwia śledzenie wyników uzyskanych w pracy.

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

W trakcie zapoznawania się z rozprawą doktorską pojawiły się pewne uwagi i pytania odnoszące się do merytorycznych aspektów pracy, na które z przyjemnością usłyszałbym dodatkowe wyjaśnienia/komentarze:

- Str. 14: Doktorant pisze w podrozdziale 1.2 Scope of the thesis, tłumacząc na j. polski „ta praca doktorska nie rozpatruje problemu tolerowania bizantyjskich błędów ani w systemach czasu rzeczywistego ani w systemach wbudowanych”, nie daje jednak odpowiedzi na pojawiające się natychmiast pytanie – dla jakiego typu systemów ten problem jest rozpatrywany ?; z drugiej strony, z dalszych części rozprawy wynika jasno, że rozpatrywane są systemy działające w czasie rzeczywistym
- Niektóre wyniki eksperymentalnych badań zaproponowanych algorytmów są bardzo entuzjastyczne – podsumowanie rozdz. 3 wskazuje na 30%-50% poprawę wydajności, w podsumowaniu rozdz. 4 wskazywany jest wzrost wydajności rzędu 30%-500%; mam wątpliwości co do takiego rzędu poprawy efektywności algorytmów, literatura naukowa dotycząca różnych zagadnień pokazuje, że ta poprawa jest zwykle 10-krotnie mniejsza; być może takie wyniki osiągnięto dla jakichś specyficznych parametrów badanego systemu; nie miałbym takich wątpliwości lub byłyby one mniejsze gdyby te wyniki badań zostały potwierdzone publikacją w jakimś renomowanym czasopiśmie z tzw. listy filadelfijskiej, a nie tylko w materiałach konferencyjnych
- Wyróżniającą cechą tej rozprawy doktorskiej jest włączenie mechanizmów adaptacyjności do protokołów replikacji tolerujących błędy bizantyjskie, które umożliwiają, jak pokazał doktorant, podtrzymywanie wysokiego stopnia wydajności systemu w warunkach zmieniających się parametrów systemu rozproszonego; trzeba jednak pamiętać, że adaptacja której elementem jest zwykle proces uczenia się jest kosztowna i te koszty w sposób naturalny zmniejszają wydajność systemu; doktorant wspomina w podrozdziale 7.2 Conclusions o takich możliwych konsekwencjach używania protokołów adaptacyjnych; rozprawa doktorska byłaby

pełniejsza gdyby doktorant włączył do niej również eksperymenty pokazujące ograniczenia związane z użyciem adaptacyjnych protokołów.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych ?

Systemy rozproszone to jedna z najbardziej dynamicznie rozwijających się aktualnie technologii informatycznych – obszaru nauk technicznych, a kwestia zapewnienia wysokiej wydajności ich funkcjonowania, w szczególności w warunkach tolerowania błędów bizantyjskich ma zasadnicze znaczenie z punktu widzenia różnorodnych zastosowań. Uzyskane w rozprawie wyniki teoretyczne i praktyczne w zakresie adaptacyjnych protokołów replikacji tolerującymi błędy bizantyjskie tworzą nowe jakościowe podstawy dla tej dziedziny, ze względu na nowe fundamentalne ujęcie szeregu kwestii związanych z tymi protokołami, uzyskane dzięki uwzględnieniu koncepcji adaptacyjności.

Bez wątpienia więc, osiągnięte przez doktoranta wyniki będą miały znaczący wpływ dla nauk technicznych, zarówno w aspekcie teoretycznym jak i praktycznym.

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**

Rozprawa rozpatruje szerokie spektrum zagadnień. Doktorant buduje ją startując z opracowania szczegółowych mechanizmów, kontynuuje opracowując oryginalne protokoły i kończy stworzeniem uniwersalnej metodologii. Uważam, że praca jest bardzo dobra i **spełnia wymagania z wyraźnym nadmiarem**.

9. Konkluzja

Uważam, że recenzowana rozprawa zawiera oryginalne i znaczące wyniki teoretyczne jak też praktyczne w zakresie protokołów replikacji tolerujących błędy bizantyjskie. Uzyskane wyniki stanowią znaczący wkład doktoranta do teorii i praktyki systemów rozproszonych funkcjonujących w środowisku występowania błędów bizantyjskich. Doktorant wykazał się dużą wiedzą teoretyczną dotyczącą zagadnień protokołów replikacji tolerujących błędy bizantyjskie jak też pokazał swoje umiejętności w zakresie tworzenia modeli matematycznych i modeli symulacyjnych. Jestem przekonany, że wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą Ustawę o Stopniach i Tytułach Naukowych zostały w pełni spełnione. Wnoszę więc o dopuszczenie mgr inż. Macieja Zbierskiego do publicznej obrony Jego pracy.

