

Politechnika Warszawska  
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Warszawa, 20 grudnia 2017 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 16 stycznia 2018 r. publiczna obrona rozprawy doktorskiej

**mgr inż. Adama Krechowicza**

temat: „Metody zapewnienia spójności danych w dwuwarstwowych skalowanych rozproszonych strukturach danych przy zachowaniu ich wysokiej wydajności”

**promotor – dr hab. inż. Roman Stanisław Deniziak, prof. Politechniki Świętokrzyskiej**  
**promotor pomocniczy – dr inż. Grzegorz Łukawski z Politechniki Świętokrzyskiej**

**recenzenci:**

**prof. dr hab. inż. Stanisław Kozielski z Politechniki Śląskiej**  
**dr hab. Tadeusz Pankowski, prof. Politechniki Poznańskiej**

Obrona odbędzie się w dniu 16 stycznia 2018 r. w sali 116 na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych – Gmach im. Janusza Groszkowskiego, Warszawa, ul. Nowowiejska 15/19; początek godz. 10.00.

Po adresie: [www.elka.pw.edu.pl/Wydzial/Rada-Wydzialu/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje](http://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

Rodzaj pracy: rozprawa doktorska

Autor- mgr inż. Adam Krechowicz

Promotor – dr hab. inż. Roman Stanisław Deniziak, prof. PŚk

Tytuł rozprawy doktorskiej: "Metody zapewnienia spójności danych w dwuwarstwowych skalowanych rozproszonych strukturach danych przy zachowaniu ich wysokiej wydajności".

Streszczenie:

W ostatnich latach koncepcja BigData zdobywa coraz większą popularność. Umożliwia ona wykonywanie dokładnych analiz biznesowych i uzyskiwanie nowych wniosków z istniejących zbiorów danych. Dzięki niej przedsiębiorstwa mogą świadczyć usługi na coraz lepszym poziomie oraz generować większe zyski ze swojej działalności.

Aby właściwie skorzystać z zalet BigData konieczne jest gromadzenie olbrzymich zbiorów danych. W tym celu powstała cała gama systemów powszechnie znanych jako NoSQL. Systemy te pozwalają na gromadzenie różnorodnych danych w wydajny sposób, często w rozproszonym środowisku. Systemy te nie są jednak pozbawione wad. W stosunku do tradycyjnych baz danych nie oferują dobrych mechanizmów realizacji zapytań oraz w zdecydowanej mierze nie pozwalają na wykonywanie transakcji. Systemy te często oferują tylko podstawowy model spójności, który w wielu wypadkach okazuje się niewystarczający.

Skalowalne Rozproszone Dwuwarstwowe Struktury Danych (SD2DS) są interesującą koncepcją rozproszonego systemu przechowywania danych, która została z sukcesem wykorzystana do budowy wydajnego systemu NoSQL. W swojej podstawowej formie SD2DS nie oferuje jednak żadnych metod zapewniania spójności.

Celem niniejszej pracy jest stworzenie metod zapewniających spójność systemu opartego na koncepcji SD2DS w sposób, który nie spowoduje znaczącego spadku wydajności takiego systemu. Dotychczasowe prace w tej dziedzinie nie zapewniają zadowalającej wydajności przez co konieczne okazały się dalsze badania w tym kierunku.

Zastosowanie wydajnych metod zapewniania spójności pozwoli na przygotowanie systemu opartego na koncepcji SD2DS, który będzie mógł zostać zastosowany w praktycznych aplikacjach. Początkowe testy wydajnościowe pozwalają zakładać, że taki system będzie mógł z powodzeniem konkurować z istniejącymi magazynami NoSQL.

dr hab. Tadeusz Pankowski  
Instytut Automatyki i Inżynierii Informatycznej  
Politechnika Poznańska

**KWESTIONARIUSZ- RECENZJA ROZPRA WY DOKTORSKIEJ DLA RADY  
WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK IN FORMACYJNYCH  
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

**Tytuł rozprawy:** Metody zapewnienia spójności danych w dwuwarstwowych skalowalnych rozproszonych strukturach danych przy zachowaniu ich wysokiej wydajności

**Autor rozprawy:** mgr inż. Adam Krechowicz

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)?**

W rozprawie przedstawiono metodę zapewnienia spójności danych w systemie przechowywania danych opartym na koncepcji tzw. skalowalnych rozproszonych dwuwarstwowych struktur danych (SD2DS) z jednoczesnym zachowaniem wysokiej wydajności tego systemu. Tematyka rozprawy nawiązuje do klasycznego już modelu SDDS (*Scalable Distributed Data Structure*), opracowanego przez Witolda Litwina w latach 90-tych i opartego na haszowaniu liniowym LH\*, określanego w pracy jako jednowarstwowa skalowalna struktura danych rozproszonych. Wersja dwuwarstwowa tego modelu, zwana (SD2DS), opracowana została przez Sapięchę i Łukawskiego w roku 2013, a jej celem była poprawa efektywności SDDS poprzez redukcję ruchu w sieci wywoływanego podczas podziału bloków (wiader) danych (ang. *data buckets*). W pracach nad tym modelem brał też udział Autor rozprawy, co wynika z przedstawionej bibliografii. W dalszej części rozprawy, model SD2DS stanowi główny punkt zainteresowania Autora. Ideą tego modelu jest to, że każda jednostka danych rozpatrywana jest jako para (*nagłówek, ciało*), zwana *komponentem*. Wówczas kosztowny proces podziału wiader i przemieszczania danych między wiaderkami, wymagany w klasycznym modelu SDDS, dotyczy tylko nagłówków, a miejsca pamiętania ciał (a więc danych zasadniczych) są relatywnie stałe. Zmniejsza to ruch w sieci, gdyż wielkość nagłówków jest istotnie mniejsza od wielkości ciał danych. Stwarza to jednak nowe problemy związane ze spójnością. Rozwiązanie tego problemu jest celem przedstawionej rozprawy.

Opiniowana rozprawa ma 166 stron i składa się z dziesięciu rozdziałów, wykazu bibliografii liczącej 105 pozycji, gdzie w przypadku aż 12 pozycji Doktorant jest autorem lub współautorem. Zamieszczono także spis symboli z objaśnieniem ich znaczeń.

Rozdział 1 jest wstępem do pracy i uzasadnia celowość zajęcia się tematyką będącą przedmiotem rozprawy. Autor zwraca uwagę na znany konflikt między spójnością danych, czasem dostępu do danych i odpornością na podział sieci, sformułowany w tzw. *twierdzeniu CAP* stwierdzającym, że spójność musi być często poświęcona na rzecz dwóch pozostałych charakterystyk systemów rozproszonych. Problemy spójności w modelu SD2DS Autor analizuje w rozdziale 4. Omawia przy tym niespójności w warstwie nagłówków, w warstwie ciał i między warstwami, a także niespójności między komponentami i niespójności w przypadku awarii. Zasadnicza część rozprawy obejmuje rozdziały od 5. do 9. W rozdziale 6 zamieszczona jest szczegółowa analiza różnych możliwych niespójności w modelu SD2DS. Metody zapewnienia spójności przedstawiono w rozdziale 7, a w rozdziale 8 Autor analizuje problemy spójności w systemie TS2DS, który jest rozszerzeniem modelu SD2DS w kierunku

zapewnienia większej przepustowości systemu. W rozdziale 9 Autor zawarł ocenę wydajności systemów SD2DS oraz TS2DS wykonując testy obliczeniowe na eksperymentalnych implementacjach tych systemów.

Cel i teza pracy zostały sformułowane w brzmieniu następującym: „*Możliwe jest zachowanie spójności dwuwarstwowych skalowalnych rozproszonych struktur danych przy zachowaniu ich wysokiej wydajności*”.

Uważam, że zarówno obszar naukowy rozprawy, jak i jej teza zostały jasno i precyzyjnie określone. Praca ma charakter teoretyczny i praktyczny. W zakresie teoretycznym formułowane są twierdzenia odnoszące się do warunków koniecznych zachowania spójności w modelu SD2DS, a także jego wersji TS2DS, a warstwa praktyczna obejmuje realizację praktyczną algorytmów zachowania spójności oraz implementację prototypu systemu. Autor podkreśla, że opracowane rozwiązanie może być z sukcesem wykorzystane do budowy wydajnych systemów określanych jako systemy NoSQL i może z powodzeniem konkurować z istniejącymi rozwiązaniami w tym zakresie.

Tematyka rozprawy sytuuje się zatem w obszarze badawczym związanym z poszukiwaniem efektywnych metod pamiętania i udostępniania danych organizowanych według modeli NoSQL, a w szczególności tzw. *modeli klucz/wartość (key/value)*. Uważam, że podjęcie tematu rozprawy doktorskiej w tym zakresie było celowe i potrzebne, zarówno ze względów poznawczych, teoretycznych, jak i praktycznych, a postawione cele i jasno sformułowana teza pracy określają istotne i aktualne, na tle obecnego stanu wiedzy, zadania badawcze.

**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?**

Bieżący stan wiedzy Autor przedstawia w rozdziałach 2 i 3. W rozdziale 2 omawiane są problemy spójności w systemach informatycznych. Charakteryzowany jest problem spójności w tradycyjnych SQL-owych bazach danych oraz mechanizmy zapewnienia ich spójności w przypadku wykonywania transakcji współbieżnych zgodnie z postulatami ACID (*Atomicity, Consistency, Isolation, Duration*). Następnie omawia spójność w systemach rozproszonych i specyficzne rozumienie tego pojęcia w przypadku systemów z replikacjami danych. W końcowym podrozdziale koncentruje się na spójności w magazynach danych NoSQL i Big Data, przy czym omawia kilka modeli danych NoSQL i charakteryzuje modele spójności dla tych modeli.

Uważam, że w tej części pracy Autor zbyt dużo miejsca poświęca dobrze znanym problemom spójności w SQL-owych bazach danych i problemom zarządzania transakcjami współbieżnymi. Jest to szczegółowo opisane w podstawowych podręcznikach akademickich. Zamiast tego warto było by więcej miejsca poświęcić modelom NoSQL, a w szczególności problemom spójności danych w tych modelach. Nie do końca bowiem zgadzam się ze stwierdzeniem Autora na str. 15 rozprawy, że „*jedną z najbardziej dotkliwych wad tych systemów [tzn. systemów NoSQL] jest brak silnych modeli spójności*”. W niektórych modelach, na przykład *key/value* w MS Azure Table istnieją mechanizmy zapewnienia spójności. Autor omawia też modele spójności w systemach replikowanych i związane z tym protokoły zatwierdzania transakcji. Wątpliwości budzi jednak celowość tych rozważań, skoro w części zasadniczej rozprawy Autor w żaden sposób się do nich nie odwołuje. Co prawda w modelu TS2DS występuje pewien rodzaj replikacji, jednak identyfikowane w nim problemy spójności są innego rodzaju.

Lektura tej części rozprawy przekonuje mnie, że Autor dobrze rozumie problemy, jakie związane są przedmiotem rozprawy. Dobrze też rozumie stan wiedzy w świecie, a także poziom rozwiązań światowych w interesującym go zakresie. Co prawda wiele problemów zostało jedynie zasygnalizowanych, niemniej jednak uważam, że analiza źródeł przedstawiona w rozprawie pozwala właściwie ocenić istotność i oryginalność rozwiązań proponowanych w rozprawie.

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

W moim przekonaniu Autor jasno i precyzyjnie sformułował problemy, których rozwiązaniu poświęcona jest rozprawa, a następnie rozwiązał je w zadawalającym stopniu. Dokonał szczegółowej analizy zagadnień związanych ze spójnością w modelach SD2DS i TS2DS i zaproponował metodę ich rozwiązania. Proponowane rozwiązanie przedstawiono na poziomie teoretycznym w postaci szeregu twierdzeń formułujących warunki konieczne i dostateczne występowania niespójności oraz sformułowano warunki, których spełnienie eliminuje występowanie niespójności. Autor wykonał też prototypową implementację, która pozwoliła mu ocenić zarówno efektywność własnych propozycji, jak dokonać porównań z wybranymi istniejącymi rozwiązaniami.

Jednak – doceniając istotność rozwiązań co do przydatności w rozważanej klasie systemów – mam wątpliwości co do oryginalności formułowanych twierdzeń. Uważam, że są one powtórzeniem dobrze znanych faktów z teorii transakcji współbieżnych, gdzie zarządzanie tymi transakcjami jest oparte na blokowaniu dwufazowych bądź na uporządkowanych znacznikach czasowych.

**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?**

Główne wyniki rozprawy, które stanowią samodzielny i oryginalny dorobek Autora, są w mojej ocenie następujące:

- *Zaproponowanie sformalizowanego modelu systemu SD2DS obejmującego dwuwarstwowe struktury danych, operacje na tych strukturach i warunki spójności dla tych struktur.*

Model SD2DS zawiera pojęcie *komponentu* złożonego z *nagłówka* i *ciała*, oraz definiuje operacje złożone (procedury, typy transakcji): PUT, GET, DEL i UPDATE, a następnie także COPY. Nagłówki umieszczane są w wiaderkach pierwszej warstwy (adresowanych za pomocą funkcji haszującej), a ciała w wiaderkach drugiej warstwy. Operowanie w systemie SD2DS odbywa się za pomocą wspomnianych procedur. Autor przeprowadził wnikliwą analizę problemów spójności danych w takim modelu.

- *Analiza problemów spójności danych w modelu SD2DS.*

Autor definiuje pojęcie spójności systemu SD2DS oraz rodzaje niespójności, jakie mogą wystąpić w przypadku współbieżnego wykonywania procedur podczas dodawania, usuwania i modyfikacji komponentu. Oddzielny rodzaj niespójności powstaje wtedy, gdy procedury zmieniające stan systemu nie zostaną poprawnie zakończone.

- *Opracowanie metody eliminacji niespójności w modelu SD2DS.*

Metoda ta oparta jest na wprowadzeniu mechanizmów szeregowania operacji poprzez przypisywanie procedurom tzw. *numerów sekwencyjnych*. Numery te nadawane są każdej

procedurze wykonywanej na komponencie, a za ich generowanie odpowiadają wiaderka pierwszej warstwy. Numery sekwencyjne liczone są indywidualnie dla każdego komponentu i następnie wykorzystywane są do szeregowania operacji przez wiaderka drugiej warstwy. Oddzielne rozważania dotyczą eliminacji niedokończonych operacji. Zmiany wprowadzone przez takie procedury muszą być dokończone lub wycofane.

- *Opracowanie metody eliminacji niespójności w systemie TS2DS, który jest wariantem SD2DS zorientowanym na zwiększoną przepustowość.*

Celem utworzenia modelu TS2DS jest poprawa skalowalności ze względu na liczbę zapytań w systemie. W tym celu proponuje się pamiętanie dwóch kopii ciała umieszczonych w różnych wiaderkach, a więc tworzenie replik. Ta replikacja dotyczy jednak tylko ciał a nie nagłówków. Autor analizuje problemy niespójności podczas współbieżnego wykonywania procedur na tak replikowanych danych, w szczególności szeregowanie operacji kopiujących ciało (procedura COPY).

- *Przeprowadzenie eksperymentów obliczeniowych charakteryzujących wydajność różnych architektur SD2DS i T2DS.*

Przeprowadzone testy obliczeniowe wykonane na prototypowej implementacji pozwoliły zweryfikować modele teoretyczne, a testy porównawcze z takimi systemami jak MongoDB i MemCached dały obiecujące wyniki.

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

W moim przekonaniu Autor wykazał się wystarczającą poprawnością w przedstawianiu wyników. Moje główne zastrzeżenia dotyczą pewnego braku spójności między rozważaniami we wstępnej części pracy i jej częścią zasadniczą (precyzuję to w następnym punkcie). Uważam też, że niepotrzebnie wprowadza formalne zapisy tam, gdzie nie jest to konieczne. Zaciemnia to nieco wywód.

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

Podczas analizy rozprawy nasunęło mi się kilka uwag krytycznych i dyskusyjnych, które opisuje poniżej.

1. *Stosunek omawianego modelu i jego implementacji do klasycznej wersji modelu SDDS i algorytmu LH\* według Witolda Litwina [62].*

Praca SD2DS oparta jest na idei systemów SDDS wykorzystujących algorytm haszowania liniowego LH\* opublikowany w pracy [62]. Jednak o specyfice tych systemów mówi się w rozprawie tylko we wprowadzającym rozdziale 3. Rozważania w zasadniczej części pracy zupełnie od tego abstrahują, a przecież algorytm LH\*, jak wynika ze wstępu, jest podstawą implementacji systemów SD2DS i TS2DS. Jak w szczególności wygląda problem przechowywania i przekazywania parametrów  $i$ , tj. poziomu wiaderka (ang. *bucket level*) i  $h$  – wskaźnika pliku (ang. *file pointer*), które ponadto mogą mieć różne wartości na poziomach klientów i na poziomie globalnym? Jak realizowane są funkcje *Hash()* i *Split()*, które zależą od wspomnianych parametrów? Nic nie wspomniano o łączeniu wiader, jako odwrotności funkcji *Split()*. Jak zatem ma się zrealizowana prototypowa implementacja do klasycznej wersji systemu SDDS? Czy takie operacje jak alokacja pamięci dla wiader – w końcu inicjowana w systemie rozproszonym przez wielu współbieżnie pracujących klientów – nie wywołuje żadnych problemów związanych ze spójnością?

## 2. Zarządzanie transakcjami współbieżnymi w SD2DS a niespójność danych.

Rozważania dotyczące wykonywania procedur w systemie SD2DS są w istocie bardzo uproszczonym wariantem zarządzania transakcjami współbieżnymi dobrze rozpoznanymi w systemach baz danych w tym w bazach rozproszonych i bazach replikowanych. Rozważania w rozprawie ograniczają się do pięciu typów transakcji (PUT, GET, DEL, UPDATE i COPY), z których każda działa jedynie na dwóch danych, tj. na nagłówku i ciele. Wszystkie problemy ze spójnością, dyskutowane w kontekście systemu SD2DS, wynikają z faktu naruszania zasad szeregowalności historii przetwarzania. Zdecydowana większość twierdzeń formułowanych przez autora w rozprawie jest w istocie powtórzeniem tej fundamentalnej zasady. Proponowana przez autora metoda szeregowania operacji oparta na przypisywaniu numerów sekwencyjnych, jest w istocie wariantem metody opartej na uporządkowanych znacznikach czasowych (ang. *timestamp ordering*) opisanej w wielu podręcznikach akademickich.

Jednak w tym konkretnym przypadku podejście autora w znacznym stopniu się broni. Stosowanie ogólnych mechanizmów zarządzania transakcjami współbieżnymi zapewniających realizację wszystkich postulatów ACID jest często zbyt kosztowne. Stąd też opracowywanie własnych rozwiązań, implementujących wybrany podwariant ogólnych mechanizmów, może być uzasadnione. Mimo to odczuwam niedosyt ukazania proponowanej metody na tle metod ogólnych.

## 3. Sposób zdefiniowanie procedury (transakcje) operujących w systemie SD2DS.

Moje wątpliwości budzi sposób zdefiniowania niektórych procedur (transakcji) w systemie SD2DS. Na przykład: (1) *Procedura DEL*. Procedura najpierw usuwa nagłówki, a dopiero potem ciało. Wydaje się, że powinno być odwrotnie. Usunięcie nagłówka powoduje utratę adresu ciała (danych), które należy usunąć. Gdy nastąpi awaria i utrata danych roboczych wtedy tracimy adres wiaderka z ciałem danych. Gdyby zacząć od usunięcia ciała, sprawa byłaby prostsza. Ponadto DEL nie uwzględnia operacji łączenia wiaderek dla nagłówków w przypadku przekroczenia pewnej wartości progowej. (2) *Procedura UPDATE*. W procedurze nie uwzględniono przypadku, gdy aktualizowane ciało nie mieści się w dotychczasowym wiaderku.

## 4. Uwagi metodyczne i redakcyjne.

- Zastrzeżenia budzi niespójność między rozdziałami wprowadzającymi, a częścią zasadniczą rozprawy. Wspomniałem już powyżej, że analizowane w rozprawie problemy bardzo słabo odnoszą się do podstaw teoretycznych systemów klasy SDDS opartych na haszowaniu liniowym. Rozważania problemów spójności w systemach informatycznych (rozd. 2) dotyczą spójności rozumianej jako zachowaniu pewnych warunków dotyczących *stanu danych*. W tradycyjnych bazach danych warunki te definiowane są jako *warunki spójności*, a w systemach rozproszonych z replikacją danych rozumiane są jako *poziom aktualności (identyczności)* danych w replikach. Autor dobrze omówił tak rozumiane modele spójności w tabeli 2.2, str. 36. Jednak w rozważaniach nad spójnością w SD2DS mówi o zupełnie innym rodzaju spójności. Nie ma nic o spójności danych w takim sensie, jak to omawiane jest to w rozdziale 2. A w wielu modelach NoSQL tak rozumiana spójność łącznie z transakcjami jest uwzględniana. Przykładem jest model *key/value* w MS Azure Table.
- Autor nadużywa formalnych zapisów opartych na rachunku predykatów. Tam, gdzie jaśniej można by wyrazić myśl w języku naturalnym, umieszcza formuły rachunku predykatów. Co gorsza, bardzo często są one niepoprawne – dotyczy to wielu przypadków, gdy formuła zawiera kwantyfikator uniwersalny. Na przykład formuła (6.8) na str. 72 nigdy nie będzie prawdziwa, bo  $k$  nie jest niczym ograniczone. Podobnie (6.9), (6.10), Definicja 6.1 i inne.
- We wzorach (6.6) i (6.7) powinien być symbol przynależności, a nie zawierania.

- We wzorze (6.1) komponent definiowany jest jako para,  $c_k = (h_k, b_k)$ , gdzie  $h_k$  jest nagłówkiem, a  $b_k$  jest ciałem. Z tej definicji wynika więc, że każdy komponent ma dokładnie jeden nagłówek i dokładnie jedno ciało. Definicja 6.1. powinna więc być inaczej sformułowana i inaczej skomentowana.
- W zapisie niektórych algorytmów, na przykład 16, 17, 18 i 19, Autor stosuje instrukcję GOTO. Nie wygląda to profesjonalnie.

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

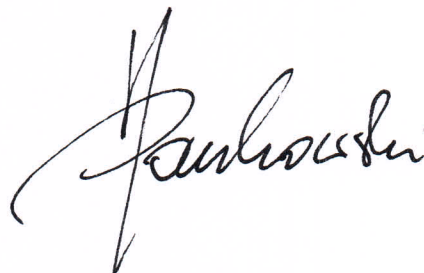
Wyniki rozprawy mogą znaleźć zastosowanie w budowie nowej klasy systemów magazynowania danych masowych, do których konieczny jest bardzo szybki dostęp. Systemy tej klasy przeznaczone są do przechowywania danych NoSQL spełniających wymagania modelu *key/value*. Przydatność ta została już wstępnie zweryfikowana poprzez wykonanie przez Autora prototypowej implementacji, której efektywność została oceniona i przedstawiona w rozprawie.

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

Rozprawę zaliczam do kategorii:

c) spełniająca wymagania.

W związku z czym wnoszę o dopuszczenie pana mgr inż. Adama Krechowicza do publicznej obrony.



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

**Tytuł rozprawy: Metody zapewnienia spójności danych w dwuwarstwowych  
skalowalnych rozproszonych struktur danych przy zachowaniu ich  
wysokiej wydajności**

**Autor rozprawy: mgr inż. Adam Krechowicz**

**Promotor: dr hab. inż. Roman Stanisław Deniziak, prof. PŚk**

**Promotor pomocniczy: dr inż. Grzegorz Łukawski**

**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)?**

Tematyka rozprawy dotyczy zapewnienia spójności danych jako wymagania stawianego przy projektowaniu narzędzi umożliwiających gromadzenie i udostępnianie zbiorów danych. Takie wymagania spełnia wiele systemów zarządzania bazami danych, czy też narzędzi wykorzystywanych w hurtowniach danych. Specyfiką podejmowanego tematu jest rozmiar rozważanych zbiorów danych oraz wymagana od narzędzi wydajność podstawowych operacji na danych. W ostatnich latach lawina danych z Internetu i innych źródeł, przybierająca postać tzw. BigData, zaczęła przekraczać granice skalowalności baz i hurtowni danych. Odpowiedzią na te potrzeby jest rozwój nowej klasy narzędzi określanych jako systemy NoSQL. Narzędzia te zapewniają potrzebną skalowalność i wydajność, te zalety są jednak zwykle okupione znacznymi ograniczeniami innych cech. Systemy NoSQL zapewniają zwykle tylko najprostsze formy wyszukiwania danych (rezygnacja z uniwersalnego języka SQL) oraz nie udostępniają mechanizmów zarządzania transakcjami lub udostępniają je tylko w ograniczonym zakresie. Brak mechanizmów transakcyjnych nie pozwala gwarantować spójności danych w tworzonych zbiorach, co może istotnie ograniczać zakres zastosowań takich systemów (np. zastosowań biznesowych).

Autor recenzowanej rozprawy podjął w niej próbę wprowadzenia mechanizmów zapewniających spójność danych do stworzonego w zespole, w którym prowadzi badania, systemu klasy NoSQL, nazwanego przez twórców skalowalnymi rozproszonymi dwuwarstwowymi strukturami danych (SD2DS). Zaproponowane rozwiązanie bazuje na gruntownej analizie źródeł możliwych niespójności danych w systemie SD2DS, opracowaniu modelu formalnego tego systemu, a następnie opracowaniu i wdrożeniu metod zapewnienia spójności danych dla podstawowych operacji zapisu, odczytu, modyfikacji i usuwania zestawów danych. Te same kroki zrealizowano również dla nowej wersji tego systemu (TS2DS) o zwiększonej przepustowości.

Teza rozprawy została sformułowana następująco:

*„Możliwe jest zachowanie spójności dwuwarstwowych skalowalnych rozproszonych struktur danych przy zachowaniu ich wysokiej wydajności.”*

Teza rozprawy została sformułowana jasno.

Autor określił też cel rozprawy:

*„Celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest analiza niespójności, jakie mogą wystąpić podczas korzystania z magazynu opartego na koncepcji SD2DS oraz zapewnienie metod zabezpieczających skład przed tymi niespójnościami. Istotnym aspektem tego zadania jest zapewnienie możliwie jak najlepszego modelu spójności przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej wydajności całego magazynu.”*

Rozprawa ma charakter w części teoretyczny: autor przeprowadził analizę źródeł niespójności danych, opracował model badanego systemu i metody zapewnienia w nim spójności danych, w części zaś implementacyjny i eksperymentalny: autor wykonał programową implementację opracowanych metod i eksperymentalnie sprawdził ich wydajność, a także porównał rozwijany system z rozwiązaniami konkurencyjnymi.

**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?**

Autor przedstawił analizę źródeł w rozdziałach drugim i trzecim. Obejmuje ona szeroką tematykę spójności w systemach informatycznych. W pierwszej kolejności autor skupił uwagę na systemach baz danych. Dyskutując systemy rozproszone autor przedstawił szereg stosowanych tam modeli spójności, w tym m.in.: problemy ze spójnością replikacji, problemy synchronizacji procesów w systemach rozproszonych, wzajemne wykluczanie w dostępie do zasobów, modele transakcji w systemach rozproszonych, modele spójności w systemach rozproszonych - skupione na danych i skupione na kliencie.

Kolejno autor skupił uwagę na gromadzeniu i przechowywaniu ogromnych wolumenów danych. Systemy realizujące takie zadania autor nazwał „magazynami danych” i jako przykład przedstawił systemy NoSQL (przyjęty termin „magazyny” budzi w tym kontekście pewne zaskoczenie). Krótką charakterystykę znanych rozwiązań (magazyny klucz-wartość, magazyny dokumentów, magazyny kolumnowe i magazyny grafowe) autor uzupełnił dyskusją metod zapewnienia spójności stosowanych w tak rozumianych magazynach danych. Podkreślono ograniczone możliwości w tym zakresie większości magazynów.

Po szczegółowej dyskusji cech systemów NoSQL autor przedstawił w rozdziale trzecim nieco inne podejście wykorzystujące rozproszone struktury danych. Architektura rozproszona zapewnia większą skalowalność, stąd przyjęta w literaturze dla tego podejścia nazwa: skalowalne rozproszone struktury danych (SDDS - ang. *Scalable Distributed Data Structures*).

Autor przedstawił kolejno skalowalne struktury jedno i dwuwarstwowe. Dyskutując struktury jednowarstwowe autor omówił rozmieszczanie danych w tzw. wiaderkach i algorytmy adresowania wiaderek, sporo uwagi poświęcił też odporności tych struktur i algorytmów na błędy w dostępie do danych. Wskazując na ograniczenia i wady struktur jednowarstwowych autor przedstawił następnie struktury dwuwarstwowe (SD2DS), obejmujące dwie przestrzenie danych: pierwszą, służącą do przechowywania metadanych, czyli nagłówek lokalizujących wiaderka właściwych danych, przechowywanych w drugiej przestrzeni. Jako główną zaletę takiej organizacji autor wymienił eliminację konieczności przesyłania dużych porcji danych w trakcie rozrostu wolumenu danych. Rozważając potrzebę zwiększenia przepustowości

architektury SD2DS w systemach obciążanych dużą liczbą współbieżnych zapytań klientów, autor przedstawił koncepcję architektury TS2DS, w której tworzone są, w miarę potrzeby, kopie komponentów szczególnie obciążonych pytaniami klientów. Kopie te pozwalają na zrównoleglenie odczytu komponentów i powiększenie przepustowości systemu.

Następny, czwarty rozdział pracy autor poświęcił dyskusji problemów z niespójnością rozproszonych skalowalnych dwuwarstwowych struktur danych. Analizując możliwe niespójności w pierwszej warstwie autor ocenił prawdopodobieństwo ich wystąpienia jako niskie i pominął je w dalszych rozważaniach. Dyskutując różne warianty niespójności w drugiej warstwie autor wyróżnił takie, które nie powinny wystąpić przy przyjęciu założeń ograniczających strukturę i funkcjonowanie rozważanego systemu oraz takie, które są przedmiotem badań w głównej części rozprawy.

Przedstawiona analiza istniejących rozwiązań doprowadziła autora do wniosku, że dla sprostania współczesnym wyzwaniom w zakresie gromadzenia i przetwarzania ogromnych zbiorów danych konieczna jest rozszerzenie obecnych technologii magazynów danych poprzez zastosowanie silniejszych modeli spójności. Wprowadzenie takich modeli nie powinno przy tym obniżyć wydajności budowanych systemów.

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

Wychodząc z przedstawionego w przeglądzie stanu wiedzy wniosku, że dla magazynów danych celowe jest zastosowanie silniejszych modeli spójności, Autor skupił uwagę na naszkicowanych w rozdziałach trzecim i czwartym skalowalnych rozproszonych dwuwarstwowych strukturach danych (SD2DS).

Pierwszym ważnym krokiem wykonanym w tym celu przez autora była szczegółowa analiza przypadków niespójności danych w tych systemach. W tym celu autor przedstawił (w rozdziale szóstym) model formalny (matematyczny) dwuwarstwowych systemów SD2DS. Każdy komponent przechowywany w takim systemie składa się z nagłówka i ciała: nagłówki są przechowywane w pierwszej warstwie systemu, a ciała w warstwie drugiej. Autor zdefiniował również i przedstawił sformalizowany zapis procedur wykonywanych na komponentach: zapisu komponentu do SD2DS, odczytu ciała komponentu, usunięcia oraz aktualizacji komponentu. W zapisach procedur wykorzystano m.in. notację rachunku predykatów pierwszego rzędu do zapisu wyrażeń logicznych, przedstawiono też diagramy sekwencji dla operacji realizowanych w procedurach. W oparciu o ten model autor wyróżnił, a następnie formalnie zdefiniował kilka rodzajów niespójności, jakie mogą wystąpić w systemach SD2DS w wyniku współbieżnego wykonywania lub niezakończenia rozważanych wcześniej procedur. Warunki wystąpienia niespójności w trakcie realizacji procedur zostały ujęte w formę twierdzeń, każde twierdzenie zostało udowodnione. Autor wyznaczył też prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych przypadków niespójności.

Drugim składnikiem dorobku autora rozprawy jest opracowanie metod zapewnienia spójności w rozpatrywanych systemach SD2DS. Metody te zostały przedstawione w siódmym rozdziale pracy. W pierwszej kolejności autor rozważył wprowadzenie do SD2DS klasycznych metod zapewniania spójności stosowanych w wielu systemach, takich jak blokowanie dostępu do komponentów oraz wersjonowanie ciał komponentów. Autor krytycznie ocenił jednak przydatność obu metod w rozpatrywanej w pracy klasie systemów SD2DS i w następnej kolejności przedstawił metodę eliminacji niespójności opracowaną z uwzględnieniem specyfiki tych systemów. Podstawą tej metody jest numeracja procedur wykonywanych na poszczególnych komponentach. Podczas wykonywania na komponencie operacji w pierwszej warstwie generowany jest kolejny tzw. numer sekwencyjny. Numery te są następnie przekazywane jako dodatkowe parametry procedur do drugiej warstwy. Specjalny algorytm

szeregowania zapewnia dzięki tym numerom wykonanie procedur w drugiej warstwie w takiej kolejności, w jakiej zaczęły one być realizowane w pierwszej warstwie. Taka kolejność gwarantuje ochronę przed wystąpieniem trzech wyróżnionych w pracy typów niespójności, co autor udowodnił w trzech twierdzeniach. Następnie autor wprowadził pewne ulepszenia swego algorytmu szeregowania. Pierwsze wynikało ze spostrzeżenia, że procedury odczytu danych nie powodują niespójności, można więc zrezygnować z szeregowania takich operacji, co poprawia wydajność systemu. Druga modyfikacja miała na celu wymuszone zakończenie niedokończonych przez klienta procedur wykonywanych na komponentach danych. Ostatnie ulepszenie wynikało ze spostrzeżenia, że zamiana kolejności operacji elementarnych w procedurze aktualizacji komponentu danych upraszcza proces kontroli spójności.

Po wprowadzeniu metod zapewnienia spójności w rozproszonych dwuwarstwowych strukturach SD2DS autor zajął się w następnym, ósmym, rozdziale pracy spójnością danych w nowej wersji tych systemów (TS2DS), zapewniającej zwiększoną przepustowość dzięki dopuszczeniu możliwości tworzenia kopii ciał komponentów, co pozwala na zrównoleglenie ich odczytu. Podobnie jak dla architektury SD2DS, autor wprowadził formalny model TS2DS oraz zdefiniował procedury wykonywane na komponentach i przedstawił ich sformalizowany zapis. Procedury te umożliwiają utworzenie kopii ciała komponentu w TS2DS oraz wykonanie analogicznych operacji jak dla SD2DS, tzn. zapisu, odczytu, usunięcia i modyfikacji komponentu, przy czym treść tych procedur (przedstawiona z wykorzystaniem notacji rachunku predykatów pierwszego rzędu do zapisu wyrażeń logicznych) uwzględnia możliwość istnienia kopii ciała komponentu. Zapis treści procedur autor wykorzystał następnie do analizy możliwości wystąpienia niespójności przy współbieżnym wykonaniu procedur oraz w przypadkach, kiedy dochodzi do przerwania realizacji procedur i nie są one dokończane. Podobnie jak dla modelu SD2DS warunki wystąpienia niespójności zostały ujęte w formę twierdzeń, każde twierdzenie zostało udowodnione. Finalnym etapem tej analizy jest wskazanie przez autora warunków zapewnienia spójności danych w architekturze TS2DS przy wykonywaniu przedstawionych procedur. W czterech twierdzeniach autor wykazał, że podstawowy algorytm szeregowania operacji opracowany dla systemu SD2DS chroni przed powstaniem typowych niespójności również w systemie TS2DS. Całość rozważań zamyka analiza niespójności wynikających z niedokończonych procedur i prezentacja algorytmu usuwającego takie niespójności.

W przedostatnim (dziewiątym) rozdziale pracy autor przedstawił wyniki eksperymentalnej oceny opracowanych modeli i algorytmów. Autor zaimplementował sześć uprzednio zaproponowanych i analizowanych metod zapewnienia spójności składowanych danych oraz stworzył rozproszony skład danych SD2DS i zbiór komputerów klientów korzystających z SD2DS (prawie 30 serwerów i komputerów klienckich). W takim środowisku autor przeprowadził eksperymentalne badania wydajnościowe dotyczące oceny czasu dostępu do danych, oceny skalowalności oraz oceny przepustowości poszczególnych rozwiązań. Eksperymenty te potwierdziły poprawność opracowanych metod, pokazały skalę ich zróżnicowania (zwykle niezbyt dużą) i zakresy użytecznego stosowania. Dodatkowo autor przeprowadził serię eksperymentów porównujących opracowane narzędzia z dwoma systemami klasy NoSQL: MongoDB oraz MemCached. Autor pokazał, w jakich zakresach parametrów jego rozwiązania mogą konkurować z tymi systemami.

Ostatni rozdział przedstawia końcowe podsumowanie, które w większości stanowi wybór najważniejszych szczegółowych wniosków przedstawionych w poprzednich rozdziałach pracy. Trochę zabrakło tu uogólniającego spojrzenia na całość rozprawy.

Podsumowując stwierdzam, że autor rozwiązał postawione zadania: do opisu modelu badanych struktur danych i operacji na nich wykorzystał odpowiedni aparat formalny, przeprowadził szczegółową analizę możliwości wystąpienia niespójności danych w dwóch wariantach skalowalnych rozproszonych dwuwarstwowych struktur danych, opracował

metody zapewnienia spójności danych, wykazał ich poprawność i eksperymentalnie ocenił własności rozszerzonych systemów.

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

Oryginalnym rezultatem rozprawy jest opracowanie metod analizy i metod zapewnienia spójności danych w dwuwarstwowym, rozproszonym systemie przechowywania danych SD2DS i jego wersji o zwiększonej przepustowości TS2DS. W szczególności do oryginalnych wyników uzyskanych przez autora zaliczam:

- opracowanie modelu formalnego rozproszonych skalowalnych dwuwarstwowych struktur danych (SD2DS) oraz opracowanie procedur wykonywanych na komponentach tych struktur, a następnie przeprowadzenie na podstawie tego modelu analizy możliwości wystąpienia niespójności danych,
- opracowanie dla SD2DS metody ochrony przed niespójnościami danych poprzez odpowiednie uszeregowanie operacji elementarnych w procedurach wykonywanych na komponentach danych,
- opracowanie modelu formalnego dla rozproszonych skalowalnych dwuwarstwowych struktur danych o zwiększonej przepustowości (TS2DS) oraz przeprowadzenie analizy możliwości wystąpienia w tych strukturach niespójności danych,
- opracowanie dla TS2DS metody zapewnienia spójności danych przy współbieżnym wykonywaniu procedur oraz algorytmu odtwarzania spójnego stanu danych po przerwaniu realizacji procedur.

Dorobek autora powiększa implementacja opracowanych algorytmów oraz przeprowadzenie bogatych eksperymentów, pozwalających na ocenę wydajności proponowanych struktur danych wzbogaconych o metody ochrony ich spójności.

Pozytywnie oceniam wszystkie wymienione elementy pracy. Uzyskanie powyższych wyników świadczy o zrealizowaniu celu pracy.

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

Sposób prezentacji podejmowanych w pracy zagadnień jest na ogół jasny i zwięzły, chociaż zapis dowodów niektórych twierdzeń jest niezwykle oszczędny. Tekst rozprawy został przygotowany starannie. Strona redakcyjna rozprawy nie budzi większych zastrzeżeń, kilka uwag zamieściłem w następnym punkcie recenzji.

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

Lektura pracy nasunęła mi następujące uwagi:

- Str. 18 – autor dość często potocznie używa terminu „baza danych”, gdyż do systemów: „Oracle Database”, „Microsoft SQL Server”, czy też „IBM DB2” należałoby stosować termin „system zarządzania bazą danych”.

- Str. 19 – zdanie: „... zapewnienie szeregowalności, które polega na tym, że wykonanie każdej uruchomionej transakcji na bazie danych musi zostać zakończone, zanim zostanie uruchomiona inna transakcja” odnosi się raczej do szeregowego wykonania transakcji.
- Str. 26 – zdanie: „Pomocną techniką przy eliminacji zakleszczeń jest blokowanie dwufazowe...” nie jest prawdziwe. Blokowanie dwufazowe zapewnia szeregowalność harmonogramów transakcji, natomiast raczej potęguje możliwość wystąpienia zakleszczeń.
- Str. 41 i dalsze – warto byłoby uściślić zakres rozumienia terminu „pamięć podręczna”, wielokrotnie stosowanego w rozprawie, gdyż w organizacji systemów komputerowych może on oznaczać różne rozwiązania.
- Str. 49 – nie znalazłem w pracy definicji użytego na tej stronie terminu „multikomputer”.
- Str. 51 – dla wzoru (3.1) niezbędne byłoby dodanie założenia, że klucz  $k$  jest liczbą całkowitą (na stronie poprzedniej dopuszczano, że klucz może też być łańcuchem znaków).
- Str. 72 – użycie we wzorze (6.5) indeksu  $n$  jest chyba niefortunne, bo mogłoby sugerować, że każde wiaderko pierwszej warstwy zawiera wszystkie nagłówki.
- Str. 73 – w Algorytmie 5 bada się, czy liczba nagłówków nie przekroczy przyjętego progu  $MAX\_CAPACITY_H$ . Nie wyjaśniono, czemu analogicznego badania nie przeprowadza się przy dodaniu do wiaderka ciała nowego komponentu?
- Str. 81 – pierwsze zdanie w dowodzie twierdzenia 6.1 nie jest całkiem jasne. Jeśli dwie procedury chcą dodać do składu danych obecny już tam komponent, to procedury te powinny się chyba zakończyć jakimś rodzajem błędu?
- Str. 91 – w dowodzie twierdzenia 6.10 zamiast  $K2 \rightarrow S$  winno chyba być  $Z2 \rightarrow S$ . Ponadto nie jest jasna następująca część zdania „Operacja  $S$  nie wprowadza żadnych zmian w komponencie ... „ – a co będzie, jeśli zajdzie  $|W_H^1| > MAX\_CAPACITY_H$ ?
- W rozdziale 10 „Podsumowanie” zabrakło, poza ogólnymi deklaracjami, bardziej konkretnych planów szerszego wykorzystania wyników pracy, a także planów dalszego rozwoju systemów SD2DS i TS2DS.
- Forma niektórych zdań nasuwa wątpliwości stylistyczne, np.: „działanie bazy danych” (str. 18), „działanie ... operacji” (str. 22).

Przedstawione uwagi nie obniżają mojej oceny pracy.

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

Opracowane metody zapewniają spójność danych i zostały zastosowane w skalowalnych narzędziach umożliwiających gromadzenie i dostęp do danych o dużych objętościach w rozproszonych środowiskach. Zapewnienie spójności danych było dotąd słabą stroną systemów NoSQL i innych narzędzi pozwalających na efektywne operowanie na wolumenach danych klasy BigData. Uzyskane w pracy wyniki wprowadzają więc nowe możliwości do tego typu narzędzi i otwierają nowe obszary zastosowań, np. biznesowych czy medycznych, wymagających gwarancji spójności danych. O przydatności rozprawy mogą też świadczyć wyniki eksperymentów, w których autor porównał opracowane narzędzia z wybranymi systemami NoSQL i uzyskał podobną lub lepszą wydajność z dodatkową gwarancją spójności danych. Wyniki rozprawy są więc istotne nie tylko w kategoriach naukowych, ale mają spory potencjał aplikacyjny.

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

Zaliczam rozprawę do kategorii c/ - rozprawa spełnia wymagania określone w obowiązujących przepisach.

Podpis

