

Prof. dr hab. inż. Jerzy Brzeziński
Instytut Informatyki
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 2
60-965 Poznań
Jerzy.Brzezinski@put.poznan.pl

Poznań, 14.08.2022r.

**Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Bartosza Żurkowskiego
pt. „Root Cause Analysis for Large-scale Cloud-native Applications”
(Analiza źródeł defektów działania aplikacji dużej skali w chmurze obliczeniowej)
realizowanej w ramach programu doktorat wdrożeniowy**

1. Tematyka rozprawy

Od blisko dwóch dekad obserwujemy gwałtowny rozwój chmur obliczeniowych, będących realizacją rozproszonych systemów informatycznych udostępniających na żądanie zdalne zasoby infrastrukturalne i usługi programowe. Rozwiązania te gwarantują wyjątkową skalowalność, efektywność, niezawodność i bezpieczeństwo - stając się bardzo atrakcyjne, jako platformy budowy aplikacji dużej skali. Z drugiej strony, złożoność tych systemów, składających się z ogromnej liczby komponentów sprzętowych i programowych, powoduje, że awarie (defekty) są nieuniknione i stosunkowo częste, co może pociągać za sobą znaczącą degradację efektywności systemu, duże straty finansowe czy nieodwracalne konsekwencje użytkowe. Stąd problematyka związana z budową systemów wysokiej dostępności i odpornych w znacznym stopniu na awarie jest od lat przedmiotem intensywnych badań. Obok fundamentalnych aspektów teoretycznych, jak choćby rozwiązywalność problemów dla konkretnych modeli przetwarzania rozproszonego, problematyka ta obejmuje szereg zagadnień ściśle praktycznych, w tym dotyczących lokalizacji awarii. W tym bardzo ważnym z teoretycznego i praktycznego punktu widzenia obszarze mieści recenzowana rozprawa.

W szczególności, praca koncentruje się na detekcji źródeł (pierwotnych przyczyn, root causes) awarii aplikacji dużej skali w chmurze obliczeniowej, a jej zasadniczym celem było opracowanie koncepcji i realizacja prototypowego narzędzia (systemu) pozwalającego na efektywną i precyzyjną analizę źródeł błędów (Root Cause Analysis – RCA) w tym identyfikację i lokalizację pierwotnych przyczyn awarii oraz trajektorii propagacji błędów.

Temu ogólnemu celowi podporządkowano następujące zadania szczegółowe:

- określenie specyfiki nowoczesnych aplikacji chmurowych, istotnej w kontekście rozwiązywania problemu identyfikacji i lokalizacji źródła awarii;

- zaproponowanie nowej koncepcji rozwiązania problemu analizy źródeł awarii uwzględniającej specyfikę aplikacji chmurowych;
- implementacja prototypowego systemu analizy źródeł awarii zgodnego z zaproponowaną koncepcją – systemu RCA;
- eksperymentalna weryfikacja zaproponowanego rozwiązania.

Rozprawa doktorska mgr inż. Bartosza Żurkowskiego została napisana w języku angielskim i liczy 259 stron. Spis literatury obejmuje 83 aktualne i dobrze dobrane pozycje. Układ pracy, składającej się z dziewięciu rozdziałów, podporządkowany jest realizacji wyżej wymienionych zadań. Zasadniczy tekst uzupełniony jest jednym dodatkiem oraz listami rysunków, tabel, algorytmów i zamieszczonych tekstów kodów (listingów).

Rozdział pierwszy zawiera ogólne wprowadzenie w problematykę analizy pierwotnych przyczyn awarii w nowoczesnych aplikacjach chmurowych bazujących na mikroserwisach. Przedstawiono motywację podjęcia badań i w tym kontekście sformułowano tezę i cel rozprawy oraz zasygnalizowano główne jej wyniki.

Rozdział drugi przedstawia najpierw istotne charakterystyki dedykowanych aplikacji chmurowych (Cloud-Native Applications - CNA). Następnie omówiona jest szczegółowo koncepcja analizy źródeł awarii (Root Cause Analysis - RCA), w tym podstawowa terminologia, model abstrakcyjny, kryteria oceny, stosowane techniki oraz najważniejsze wymagania dla rozwiązań. W tym kontekście dokonano dość szczegółowego przeglądu i analizy dotychczasowych podejść do analizy źródeł awarii.

Celem rozdział trzeciego jest przedstawienie proponowanej koncepcji dekompozycji problemu analizy źródeł awarii na trzy podstawowe elementy: środowisko wyznaczania korelacji obserwowanych parametrów i sygnałów - symptomów (Symptom Correlation Framework - SCF), model struktury i dynamiki systemu przetwarzania (RCA model) oraz algorytm wnioskowania (Inference Algorithm). Element pierwszy definiuje metody wyznaczania korelacji między symptomami stosowane w celu aproksymacji zależności przyczynowo-skutkowych symptomów. Uwzględniono tu przy tym spostrzeżenie, że klasyczny współczynnik korelacji (correlation coefficient) ciągów wartości dwóch symptomów jest w ogólności niewystarczający do wiarygodnego określenia poszukiwanego związku przyczynowo-skutkowego. Dlatego w pracy zaproponowano wykorzystanie nie tylko współczynnika korelacji ciągów wartości symptomów, ale dodatkowo współczynnika wynikającego z dystansu topologicznego w hierarchicznej strukturze systemu przetwarzania (structure coefficient, topological distance), współczynnika będącego funkcją zgodności aktualnego opóźnienia czasowego między symptomami z dotychczasową średnią opóźnienia (time lag coefficient), oraz współczynnika zgodności tendencji zmian porównywanych

ciągów wartość symptomów (time series coefficient). Drugi element, model RCA, reprezentuje w formie grafów zależności (dependency graphs), z jednej strony, aktualne zależności między komponentami różnych warstw systemu i aplikacji (zależności strukturalne), z drugiej zaś strony, korelacje między ciągami wartości symptomów (zależności behawioralne). Z kolei algorytm wnioskowania, na podstawie informacji reprezentowanych przez model RCA, buduje ostateczny graf zależności między symptomami i na tej podstawie wyznacza ścieżki między aktualnym symptomem wskazującym na wystąpienie awarii a lokalizacją jej pierwotnej przyczyny (root cause).

Rozdział czwarty omawia całą złożoność problemu aproksymacji zależności przyczynowo–skutkowych między symptomami (approximation of causal symptom dependencies). Docelowo chodzi bowiem nie tylko o stwierdzenie istnienia takiej zależności, ale również określenie jej kierunku i siły. Zaproponowano cztery komplementarne podejścia – metody korelacyjne: analizę współwystępowania symptomów (symptom co-occurrence analysis COA), analizę opóźnień między symptomami (symptom time lag analysis - TLA), analizę zgodności tendencji zmian serii wartości symptomów (symptom time-series analysis - TSA) oraz analizę dystansów topologicznych (symptom topological distance analysis - TDA). Celem analizy COA jest potwierdzenie istnienia oraz wyznaczenie kierunku i siły (correlation strength) korelacji między symptomami. Jest to trudny, znany problem, mający już bardzo bogatą literaturę. W pracy dokonano pogłębionej analizy istniejących rozwiązań i uzasadniono wybór jednego z nich. A kolei analiza TLA sprawdza na ile aktualne opóźnienie między symptomami jest zgodne ze średnim opóźnieniem estymowanym na podstawie wcześniejszych obserwacji. Analiza TSA zmierza natomiast do określenia stopnia zgodności tendencji zmian w seriach wartości symptomów. W końcu, analiza TDA kojarzy symptomy z komponentami struktury systemu i bada na podstawie ich odległości istotność zależności strukturalnej. Wynikiem powyższych analiz są współczynniki siły zależności między symptomami, których liniowa agregacja wyraża w jednym współczynniku wpływ wszystkich analiz wyjściowych, poprawiając potencjalnie dokładność aproksymacji zależności przyczynowo–skutkowych między symptomami.

Rozdział piąty opisuje realizację modelu RCA. Zaproponowane rozwiązanie wyróżnia w modelu cztery elementy: taksonomię obiektów systemu (system object taxonomy), graf hierarchicznej zależności obiektów systemu (system object dependency graph), odwzorowanie symptomów awarii w zbiór obiektów systemu (fault symptom ingestion) oraz mapę współwystępowania symptomów (symptom co-occurrence map). Spośród tych elementów jedynie taksonomia obiektów nie jest tworzona automatycznie, przy czym głównym wyzwaniem jest konstrukcja mapy współwystępowania symptomów. Mapa ta jest grafem reprezentującym symptomy i zależności przyczynowe między nimi, a także współczynniki siły współwystępowania symptomów i średnie czasy opóźnienia. Mapa współwystępowania symptomów jest konstruowana na podstawie odpowiednio licznych danych historycznych. Z powodu złożoności obliczeniowej tego procesu, mapy są generowane offline, a ich zapamiętane obrazy stanowią strukturę wejściową algorytmu wnioskowania.

Rozdział 6 przedstawia realizację algorytmu wnioskowania (Inference Algorithm). Pokazano w nim zastosowanie omówionych wcześniej narzędzi analizy COA, TLA, TSA i TDA w celu konstrukcji dla danego modelu RCA i aktualnego symptomu awarii zagregowanego obrazu systemu, w postaci grafu obrazu awarii (fault view graph - FVG). Dalsza analiza tego grafu pozwala na wyznaczenie możliwych trajektorii między symptomem awarii a pierwotną jej przyczyną, ocenę poszczególnych trajektorii ze względu na średni współczynnik siły zależności i długość trajektorii, a następnie - utworzenie rankingu.

Rozdział siódmy przedstawia implementację prototypu systemu RCA. Omówiono przyjętą platformę aplikacyjną (Kubernetes-based application platform) i narzędzia monitoringu (m.in. Prometheus, Elasticsearch, Falco). Dalej zaprezentowano architekturę rozwiązania, moduł automatycznej konstrukcji modelu RCA, algorytm wnioskowania i interfejs użytkownika.

Rozdział ósmy poświęcony jest ocenie poprawności i funkcjonalności zaproponowanego systemu RCA. W pierwszej kolejności przeprowadzono serię eksperymentów dla przyjętego scenariusza aplikacji i wygenerowanych losowo ciągów symptomów. Następne eksperymenty dotyczyły testowego systemu rzeczywistego, w którym losowo stymulowane awarie. Badania te potwierdziły, że zaproponowane rozwiązanie systemu RCA spełnia przyjęte wymagania, poprawnie identyfikuje trajektorie awarii, i prowadzi do wskazania jej pierwotnej przyczyny, co potwierdza osiągnięcie celu pracy.

Rozdział dziewiąty zawiera podsumowanie i wskazane kierunki dalszego rozwoju przedstawionego systemu.

Podsumowując omówienie treści rozprawy należy stwierdzić, że praca wyróżnia się bardzo staranną, dobrą redakcją. Ma właściwy układ, rozważania ogólne poparte są dobrze dobranymi przykładami i uzupełnione ilustracjami. Literatura jest kompletna, aktualna i adekwatna do rozważanej problematyki. Zgodnie z właściwą metodyką badawczą, po przedstawieniu motywacji podjętych w pracy badań - jasno określono ich cel, przeanalizowane dotychczasowe rozwiązania, dokonano wyboru przydatnych dalej wyników i narzędzi, zaproponowano oryginalne rozwinięcia i uzupełnienia, zaprojektowano i zaimplementowano oryginalny system, a wreszcie przeprowadzono szereg doświadczeń, których wyniki potwierdziły wymaganą funkcjonalność i przydatność praktyczną systemu. W szczególności, doktorant zrealizował wszystkie zadania szczegółowe postawione na wstępie i osiągnął cel w postaci opracowania nowatorskiej koncepcji, oraz projektu i prototypowej implementacji systemu analizy źródeł defektów działania aplikacji dużej skali w chmurze obliczeniowej. Wykazał się przy tym dużą wiedzą teoretyczną z zakresu statystycznej analizy ciągów czasowych oraz ogromną, w pełni aktualną wiedzą i doskonałym opanowaniem platform chmurowych i stosowanych w nich narzędzi (technik).

2. Główne wyniki i ocena wkładu oryginalnego

Do najwartościowszych oryginalnych wyników rozprawy należą:

1. Pogłębiona analiza statystycznych metod korelacji istotnych w kontekście wyznaczania relacji przyczynowo-skutkowych między symptomami awarii, oraz właściwy wybór metod adekwatnych do stwierdzania i wartościowania siły korelacji symptomów.
2. Opracowana technika detekcji punktów zmiany (change point detection techniques) i jej zastosowanie w celu poprawy dokładności analizy korelacji symptomów.
3. Zaproponowana koncepcja wyznaczania zależności przyczynowo-skutkowych między symptomami, uwzględniająca jednoczesne stosowanie i dalej agregowanie wyników czterech analiz: współwystępowania symptomów (symptom co-occurrence analysis - COA), opóźnień między symptomami (symptom time lag analysis - TLA), tendencji zmian serii wartości symptomów (symptom time-series analysis TSA) i dystansów topologicznych (symptom topological distance analysis - TDA).
4. Zaproponowana mapa współwystępowania symptomów (symptom co-occurrence map) jako struktura umożliwiająca efektywną realizację algorytmu wnioskowania.
5. Projekt, prototypowa implementacja i weryfikacja systemu RCA analizy źródeł defektów działania aplikacji dużej skali w chmurze obliczeniowej.

Powyższe wyniki zostały uzyskane w sposób poprawny i stanowią oryginalny wkład w rozwój narzędzi zarządzania chmurami obliczeniowymi i aplikacjami w nich realizowanymi, w tym w szczególności narzędzi wspomagania analizy źródeł defektów działania aplikacji dużej skali w chmurze obliczeniowej. Wyniki te mają głównie znaczenie praktyczne, co można uznać za pewien atut w kontekście realizacji pracy w ramach doktoratu wdrożeniowego. Autor wykazał się przy tym dogłębną wiedzą naukową z zakresu analizy statystycznej ciągów czasowych. Potwierdził też umiejętność twórczego wykorzystania tej wiedzy do rozwiązywania złożonych, praktycznych problemów projektowych i implementacyjnych.

3. Uwagi krytyczne i polemiczne

Uważna lektura rozprawy skłania też jednak do kilku uwag:

1. Wiele propozycji zwartych w pracy ma charakter heurystyczny, a wybory niepokoją arbitralnością - na przykład wybór metody agregacji współczynników korelacyjnych i wartości przypisanych im wag (wzór 4.33), określenie progu eliminacji współczynników korelacyjnych w grafie obrazu awarii (str. 126), czy wyrażenie definiujące wartość współczynnika dystansu topologicznego (wzór 4.32). Wybory te wymagają nieco szerszego komentarza i wyjaśnienia.

2. W pracy brakuje mi też jakiejś analizy wpływu wyboru wartości wag w funkcji agregacji współczynników korelacyjnych (wzór 4.33) na wyniki lokalizacji źródeł awarii. Być może współczynnik dystansu topologicznego (wzór 4.32), wynikający z relacji struktury systemu przetwarzania, ma decydujące znaczenie i wówczas można byłoby uniknąć bardzo czasochłonnych obliczeń statystycznych, w tym szczególnie budowy mapy współwystępowania symptomów.
3. Przyjęcie wartości 0 dla wagi przy współczynniku korelacyjnym zgodności tendencji zmian w seriach wartości symptomów (Tabela 8.3), choć w tym wypadku uzasadnione, nie powinno przesądzać o rezygnacji z tego współczynnika w dalszych eksperymentach.
4. Poważnym zagrożeniem dla realnego stosowania zaproponowanego w pracy rozwiązanie wydaje się być koszt związany z czasem pozyskania danych i konstrukcji na ich podstawie mapy współwystępowania symptomów. Obawę tę w pewnym stopniu potwierdzają dane zamieszczone na stronie 207 o czasie niezbędnym do przeprowadzenia odpowiedniej liczby symulacji awarii.
5. W pracy znalazłem tylko kilka błędów edytorskich, na przykład: str. 88 – we wzorze 4.29 brak w liczniku drugich indeksów „w”; str. 119 - na rysunku 6.2 jest 5 symptomów a nie 6; str. 152 – błędne dzielenie słowa ‘namespace’.

4. Konkluzje końcowe

Przedstawione w rozprawie wyniki stanowią oryginalny i wartościowy wkład w rozwój, ważnego z praktycznego i teoretycznego punktu widzenia, obszaru badań związanego z zarządzaniem chmurami obliczeniowymi i aplikacjami w nich realizowanymi, a w szczególności – z konstrukcją narzędzi wspomagania analizy źródeł defektów działania aplikacji dużej skali w chmurze obliczeniowej. Doktorant wykazał się szeroką wiedzą teoretyczną z zakresy analizy statystycznej ciągów czasowych. Wiedzę tę twórczo wykorzystał w realizacji praktycznej prototypowego narzędzia, co z kolei wymagało pełnego rozeznania w zakresie konstrukcji i funkcjonalności współczesnych systemów chmurowych, a nadto - dużych umiejętności projektowych i programistycznych. Właśnie walor praktyczny uzyskanych w pracy wyników zasługuje na podkreślenie, co w kontekście realizacji pracy w ramach doktoratu wdrożeniowego stanowi niewątpliwy atut.

Podsumowując opinię uważam, że cel recenzowanej rozprawy doktorskiej został osiągnięty. Mgr inż. Bartosz Żurkowski wykazał się dużą wiedzą i dojrzałością naukową, umiejętnością rozwiązywania problemów badawczych i twórczego wykorzystania wyników teoretycznych w rozwiązaniach praktycznych. Moim zdaniem, jego rozprawa spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą ustawę. Wnioskuje zatem o dopuszczenie mgr inż. Bartosza Żurkowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

