

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Wydział Elektroniki i Techniki  
Informacyjnych

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Marcin Kubacki

Wielowymiarowa analiza logów zdarzeniowych  
i wydajnościowych w systemach komputerowych

Promotor:  
prof. dr hab. inż. Janusz Sosnowski

Warszawa, 2016

## Streszczenie

Nieustannie rosnąca złożoność systemów komputerowych stawia coraz więcej wyzwań związanych z ich monitorowaniem i oceną wiarygodności. Niniejsza rozprawa została poświęcona wielowymiarowej analizie różnych rodzajów dzienników dostępnych w systemach komputerowych.

W rozprawie skoncentrowano się na badaniach związanych z dwoma głównymi rodzajami dzienników: zdarzeniowych i wydajnościowych. W pierwszym obszarze, zaproponowano metodyki i algorytmy, które obejmowały analizę z użyciem słowników, ekstrakcję klas zdarzeń w nieustrukturyzowanych formach dzienników tekstowych oraz generację wyrażeń regularnych w celu wzbogacenia komunikatów o informację o strukturze ich zmiennych fragmentów. Przedstawione algorytmy usprawniają proces analizy dzienników zdarzeniowych i zostały również wykorzystane jako jeden z etapów przetwarzania przy analizach korelacyjnych z użyciem innych rodzajów logów.

W przypadku dzienników wydajnościowych zaprezentowano metodykę z użyciem autorskiego algorytmu służącego do analizy przebiegu wskaźników obciążenia oraz profilami obciążeniowymi. Jego istotnym elementem jest umożliwienie interakcyjnej analizy na wielu poziomach szczegółowości jednocześnie. Zbadano również możliwość zaadotowania klasycznych metod analizy szeregów czasowych (dekompozycja, periodogramy, transformaty falkowe) do analizy obciążenia w systemie komputerowym i porównano je z autorskim algorytmem. Dodatkowo zaproponowano również metodykę analizy opartą o charakterystyki statystyczne pików w przebiegach czasowym.

W rozprawie przedstawiono również wyniki praktycznego zastosowania przedstawionych technik na przykładzie kilku serwerów oraz klastrów obliczeniowych. Implementacja algorytmów została zawarta w dwóch autorskich programach: *QPerfAnalyzer* i *LogMiner*, które umożliwiają wielowymiarową analizę dzienników zdarzeniowych i wydajnościowych.

Zaprezentowana w rozprawie korelacja dzienników wydajnościowych z dziennikami zdarzeniowymi oraz procesów (zaproponowanym przez autora) pozwalają na stworzenie wielowymiarowego profilu operacyjnego systemu komputerowego, który może być bardzo pomocny w poszukiwaniu przyczyny i predykcji wystąpienia problemów lub anomalii.

Analiza uzyskanych rezultatów potwierdziła przydatność zaproponowanych metodyk i algorytmów równocześnie wskazując dalsze kierunki badań w tym obszarze.

**Słowa kluczowe:** dzienniki zdarzeniowe, dzienniki wydajnościowe, monitowanie systemów komputerowych, szeregi czasowe

Prof. dr hab. inż. Henryk Krawczyk, prof. zw. PG  
Katedra Architektury Systemów Komputerowych  
Wydział Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki  
Politechnika Gdańska

**Recenzja rozprawy doktorskiej pt. „Wielowymiarowa analiza logów zdarzeniowych i wydajnościowych w systemach komputerowych”. Autor mgr inż. Marcin Kubacki.**

Motywacją do rozwoju systemów komputerowych jest postęp technologii, usprawnienie metod zarządzania i wykorzystania zasobów, jak również coraz to lepsze dopasowywanie się projektantów do oczekiwań użytkownika. Innymi słowy chodzi o zapewnienie odpowiedniego poziomu funkcjonowania systemów komputerowych. Jedną z metod oceny ich jakości jest odpowiednie monitorowanie ich zachowania się w różnych warunkach środowiska przy wykorzystaniu różnych kategorii użytkowników. Rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Kubackiego dotyczy tej problematyki. Wykorzystując dostępne w systemach komputerowych mechanizmy i narzędzia monitorowania, autor rozprawy przedstawił szereg algorytmów analizujących informację zawartą w logach i dziennikach. Zdobyta w ten sposób informacja ma duże znaczenie praktyczne i może być wykorzystana do usprawniania funkcjonowania systemów np. wzrostu ich wydajności, czy też wykrycia ewentualnych anomalii znajdujących się w systemach. Zaproponowane przez Autora rozwiązania zostały sprawdzone dla danych pochodzących z wydziałowych repozytoriów, systemów NASK oraz systemu KASKADA funkcjonującym w CI TASK (Centrum Informatyczne Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej), a także częściowo dla pewnej eksperymentalnej chmury obliczeniowej.

Recenzowana rozprawa doktorska, na podstawie przeprowadzonej kompleksowej analizy literatury, systematyzuje problematykę monitorowania systemów komputerowych i obejmuje zakres tematyczny związany z:

- wskazaniem istotnych źródeł informacji o zachowaniu się systemu komputerowego, w tym unifikacji formatów dzienników, sposobu logowania różnego typu komunikatów integracji wiedzy zawartej w dziennikach zdarzeniowych i wydajnościowych,

- doborem i opracowaniem właściwych metod opisu i analizy dostępnych danych oraz prezentacji wyników dotyczących różnego typu wskaźników i ich powiązań,
- określeniem stopnia automatyzacji procesu zbierania i analizy zarejestrowanej informacji w celu wyznaczania bieżącego stanu systemu, w tym anomalii występujących w systemie,
- implementowaniem narzędzi informatycznych (jak LogMiner wykorzystujący złożony algorytm Extract – PSG) w celu przetestowania opracowanych metod i algorytmów monitorowania i analizy zebranych danych systemowych.

Zakres omawianej tematyki jest więc szeroki, wymagający głębokiej znajomości problematyki, jak też umiejętności poszukiwania uniwersalnych rozwiązań dobrze ujmujących złożone i różnorodne podejścia praktyczne. Teza recenzowanej rozprawy doktorskiej ma charakter jakościowy i stwierdza, że cytując: „wielowymiarowa analiza logów z systemów komputerowych pozwala lepiej scharakteryzować ich profil operacyjny oraz ocenić ich wiarygodność”. Głównym więc celem rozprawy doktorskiej jest nie tylko rozpatrzenie możliwości monitorowania systemu komputerowego z punktu widzenia dostępnych dzienników zdarzeń oraz dzienników wydajnościowych, ale również analiza przyczyn wystąpienia pewnych zjawisk nietypowych. Jest to zadanie ambitne, wymagające nowego spojrzenia na funkcjonowanie i współpracę systemów o różnej architekturze i odmiennych sposobach zarządzania.

W przypadku monitorowania zachowania się systemów zaproponowano ekstrakcję istotnych zdarzeń na podstawie treści zarejestrowanych nieustrukturyzowanych komunikatów oraz ich klasyfikację w postaci wyrażeń regularnych w celu badania występowania różnego typu sytuacji. W przypadku monitorowania wydajnościowego wykorzystano metody analizy szeregów czasowych w celu dokonania wielopoziomowej charakterystyki cyklicznie występujących serii plików. Opracowano szereg algorytmów wspomagających tego typu analizę systemów i na konkretnych przykładach zilustrowano ich działanie. Wykazano nowe możliwości zarówno monitorowania i analizy zdarzeń, jak i oceny wydajności. W tym celu zaprezentowano szereg wskaźników związanych z jednej strony z pojawiającą się sekwencją zdarzeń umożliwiającą rozróżnienie złośliwych działań intruzów od normalnego zachowania się użytkowników. Z drugiej zaś strony dokonano predykcji średniego obciążenia

zasobów oraz fluktuacji obciążenia sugerujących pojawienie się anomalii w systemie. Wykorzystanie wielopoziomowej struktury (grupa – seria – pik – próbka) umożliwiło obserwację zachowania systemu zarówno dla pojedynczych wskaźników, jak też dla wielu jednocześnie. Dla tej struktury opracowano złożony i elastyczny algorytm (Extract-PSG) uwzględniający 10 parametrów (rozdz. 4.2.1). Dokonano wyodrębnienia cyklicznych aktywności **systemu** oraz wykrycia odchyłeń w ich regularności. Co więcej, dzięki mechanizmowi korelacji plików z dziennikami zdarzeniowymi i logiem procesów określono jakie aktywności w systemie mogły spowodować jego nieprawidłowe zachowanie. Opracowana metodyka analizy okazała się również przydatna w badaniu profili operacyjnych systemu oraz ich zmian w czasie (rozdz. 4.2 i 4.3). Autor przeanalizował także istotny problem wyboru wskaźników do monitorowania (rozdz. 4.2.4). Przedstawione wyniki potwierdzają tezę, że dzięki wielowymiarowej analizie można precyzyjnie określić zachowanie systemu i określić przyczyny, kiedy to zachowanie odbiega od przyjętej normy.

Brakuje jednak w rozprawie bezpośredniego odniesienia się do sformułowanej tezy po dokonaniu serii eksperymentów. Dlatego pozostaje otwarte pytanie w jakim stopniu tego typu analiza zachowania się systemu jest możliwa dla różnych kategorii systemów i dla różnych środowisk w których one pracują. Idąc dalej oczekivalibyśmy oceny różnego typu mechanizmów monitorowania, jako sugestii dla projektantów takich systemów. Oczywiście trzeba przy tym podkreślić, że tego typu analizy wymagają długich obserwacji zachowania systemu (często nawet kilkuletnich), co znacznie utrudnia kompleksową ocenę opracowanych algorytmów. Poza tym dostępne systemy różnią się pod względem różnych aspektów co stwarza ogromne problemy ze sformułowaniem takich wniosków, wykorzystując proponowane podejście.

Precyzyjna analiza zachowania systemu wymaga monitorowania i rejestrowania coraz większej liczby wskaźników. To wpływa również w dużym stopniu na zachowanie się samego systemu. Tego typu zjawisko jest nazywane „efektem próby” i stanowi poważną barierę oceny zachowania się systemu. Powstaje więc pytanie jak w świetle przedstawionej koncepcji monitorowania, postępować z tego typu problemami.

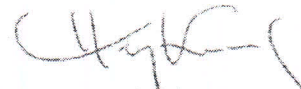
Praca jest zredagowana starannie, tekst jest zrozumiały dla czytelnika i może stanowić inspirację do dalszych badań.

Reasumując, biorąc pod uwagę, że Autor rozprawy:

- sprecyzował konkretny problem badawczy i podał jego rozwiązanie,
- zaproponował kilka oryginalnych algorytmów analizy logów i dzienników oraz zweryfikował je praktycznie na przykładzie rzeczywistych elementów systemów komputerowych,
- zaproponował nowe możliwości wielowymiarowego monitorowania i wykazał, że jest ono obiecującym rozwiązaniem dla oceny wydajności systemu oraz stopnia wykorzystania jego zasobów, jak też wykrycia anomalii, które w inny sposób mogą nie być wykryte,

stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Kubackiego spełnia ustawowe wymagania i może zostać poddana kolejnym etapom procesu doktoryzowania.

Z uwagi na oryginalność podejścia i praktyczną przydatność wyników rozprawy doktorskiej, a także szerokie opublikowanie jej wyników, sugeruję wyróżnienie rozprawy.

  
prof. dr hab. inż. Henryk Krawczyk  
prof. zw. PG

**Białystok 30 maja 2016****Prof. Ndzw. Stanisław Jarząbek**  
Politechnika Białostocka

## **Recenzja Rozprawy Doktorskiej mgr inż. Marcina Kubackiego pt. : „Wielowymiarowa analiza logów zdarzeniowych i wydajnościowych w systemach komputerowych”**

### **Uwagi ogólne**

Rozprawa opisuje nowatorskie rozwiązania w ważnym temacie wiarygodności systemów komputerowych, w zakresie metod identyfikacji zagrożeń ciągłości i poprawności ich pracy. Z uwagi na to że systemy komputerowe wkraczają w coraz to nowe domeny życia i sprawują kontrolę nad procesami od których zależy życie i zdrowie ludzkie, rozwiązania zmierzające w kierunku zwiększenia niezawodności systemów są szczególnie ważne. Autor wybrał za przedmiot rozprawy doktorskiej tematykę aktualną i potrzebną.

Dzienniki (tzn. logi automatycznie zbieranych danych dokumentujących wykonanie programów) są podstawowym źródłem informacji o pracy systemów. W praktyce, potrzebne są zaawansowane metody analizy dzienników aby z morza często nieuporządkowanych danych wydobyć informacje pomocne w identyfikacji problemów i umożliwiające poprawę wiarygodności systemów. Niniejsza rozprawa dotyczy monitorowania i analizy dzienników zdarzeniowych i wydajnościowych dostępnych w systemach komputerowych w celu lepszej oceny ich wiarygodności.

W ramach *analizy zdarzeniowej*, autor zaproponował nowe metody i algorytmy dla ekstrakcji zdarzeń w nieustrukturyzowanych dziennikach tekstowych, z użyciem słowników, oraz dla generacji wyrażeń regularnych w celu wzbogacenia komunikatów o informacji o strukturze ich zmiennych fragmentów. Zaproponowane metody usprawniają proces analizy zdarzeń. Jednocześnie autor dokonał nowatorskich ich zastosowań w analizie korelacyjnej i z użyciem innych logów. W ramach analizy dzienników wydajnościowych, autor zaproponował nowatorskie rozwiązania w zakresie analizy przebiegu wskaźników obciążenia, umożliwiające interakcyjną analizę na wielu poziomach szczegółowości. Metodyka analizy opiera się na charakterystykach statystycznych pików w przebiegach czasowych.

Praca doktorska obejmuje implementacje algorytmów (programy *QPerfAnalyzer* i *LogMiner*) i ewaluację metod. Autor przetestował zaproponowane metody na przykładach kilku serwerów oraz klastrów obliczeniowych i wyniki testów są szczegółowo opisane w rozprawie.

Ważnym wkładem pracy są implikacje wynikające ze zbadania korelacji dzienników wydajnościowych z dziennikami zdarzeniowymi. Prowadzą one do stworzenia wielowymiarowego profilu operacyjnego systemu komputerowego, pomocnego w poszukiwaniu przyczyn anomalii i predykcji ich występowania.

W sumie, autor zaproponował nowatorskie rozwiązania które rozszerzają stan wiedzy w dziedzinie analizy logów zdarzeniowych i wydajnościowych, zwiększają efektywność istniejących rozwiązań, i pozwalają na nowe zastosowania. Zarówno problem naukowy będący przedmiotem pracy jak i jego rozwiązanie autor jasno sformułował i opisał. Autor przekonująco uzasadnił praktyczne wartości zaproponowanych metod i demonstrowanych wyników.

### **Analiza istniejącego stanu wiedzy i teza pracy**

Istnieje bogata literatura na temat roli analizy logów w wykrywaniu anomalii i dla zwiększenia niezawodności systemów. Badacze są zgodni co do tego że kluczem do oceny zachowania się systemu są dzienniki zdarzeniowe i wydajnościowe informujące o tym, jak system działał i w jakim stopniu był obciążony. Początkowe badania nad dziennikami niestrukturalnymi zaowocowały rozwiązaniami do których autor również miał swój wkład. Autor dokonał krytycznej analizy tych wcześniejszych rozwiązań i na tej bazie w sposób przekonujący umotywowwał kierunek badań podjętych w pracy doktorskiej, której główną tezę jest stwierdzenie:

„wielowymiarowa analiza logów z systemów komputerowych pozwala lepiej scharakteryzować ich profil operacyjny oraz ocenić ich wiarygodność”.

Autor dokonał wyczerpującej analizy istniejących rozwiązań we Wprowadzeniu, Rozdziale 2 i w pierwszych partiach Rozdziałów 3 i 4. Wykaz cytowanej literatury obejmuje ponad 100 reprezentatywnych pozycji naukowych, w tym wiele z okresu ostatnich lat. Na bazie tej analizy, w Rozdziałach 3 i 4 autor przedstawił własne rozwiązania. Rozdział 5 przedstawia wyniki analizy korelacyjnej pomiędzy dziennikami.

### **Jakość zaproponowanych rozwiązań i ich opisu**

W analizie dzienników zdarzeniowych, jako punkt wyjścia autor przyjął szeroko pojęte znaczenie zdarzeń rejestrowanych w dziennikach tak aby ich analiza dawała możliwie głębokie wniknięcie w problemy i anomalie działania systemu. Oprócz stwierdzenia, kiedy i co się wydarzyło, autor uwzględnił również dane dotyczące źródła zdarzenia, miejsca jego wystąpienia oraz informacje odnośnie jednostki (osoby lub systemu) będącego przyczyną tego zdarzenia. Autor zaadresował trudności wynikające z braku powyższych informacji lub też z niestrukturalnego a zatem niejasnego formatu zapisu takich informacji, utrudniających ich analizę.

W szczególności, autor zastosował analizę statystyczną i leksykalną dzienników zdarzeniowych. Analiza statystyczna umożliwiła wyznaczenie statystyk występowania zdarzeń w różnych perspektywach czasowych i przestrzennych, co prowadzi do lepszego określenia zachowania się systemu i zawężenia analizy do obszarów potencjalnie zagrożonych występowaniem anomalii wpływających na podejrzane zachowanie systemu.

W analizie leksykalnej autor skoncentrował się na statystykach wystąpień słów w dziennikach zdarzeniowych w celu wyodrębniania zdarzeń najbardziej znaczących, jak błędy czy komunikaty ostrzegawcze. W ewaluacji zaproponowanej metody, autor wykazał że tak skonstruowane słowniki w oparciu o które przeprowadzono analizę pomagają w odnajdowaniu komunikatów istotnych z punktu widzenia administratora. Dodatkowym atutem prezentowanego podejścia jest analiza zmienności statystyk występowania słów w dziennikach w czasie, co umożliwia wykrycie anomalii takich jak niespodziewane zmiany w konfiguracji systemu.

Autor uzupełnił statystyki występowania w czasie danych słów i fraz, informacją o istotności danej frazy w oparciu o statystykę występowania w zdarzeniach.



Zaproponowane algorytmy klasyfikują zdarzenia w oparciu o treść komunikatu. Algorytmy dokonują ekstrakcji części zmiennej komunikatu (np. nazwy użytkowników lub adresy IP) i grupują zdarzenia w oparciu o fragment niezmienny, który oddaje istotę zdarzenia. Takie podejście gwarantuje szybkość działania w czasie liniowym względem liczby zdarzeń i powala uniknąć konieczności trenowania algorytmu (przy pomocy metod machine learning).

Następna faza analizy dotyczy zmiennych fragmentów. Ta analiza wzbogaca algorytmy ekstrakcji klas zdarzeń z poprzedniej fazy o informacje dotyczące zawartości komunikatów.

Autor opisał proponowane metody jasno, z detalami pozwalającymi na ich zrozumienie i krytyczną analizę porównawczą z innymi metodami.

Równie ważne jest wykrywanie anomalii i potencjalnych problemów w odniesieniu do wydajności systemów, co jest celem analizy dzienników wydajnościowych. Analiza zapisu wartości wskaźników oznaczonych stemplami czasowymi zgromadzonych w dziennikach wydajnościowych prowadzi do wykrycia problemów wydajnościowych. Dekompozycja, periodogramy, transformaty falkowe, i modele ARIMA i ETS są często stosowane do badania sezonowości w danych finansowych. Metody te mogą być użyteczne przy analizie dzienników wydajnościowych, jednak takie ich wykorzystanie nie zostało dotychczas dostatecznie zgłębiane koncepcyjnie i zrealizowane.

Zaproponowany przez autora algorytm *Extract-PSG* określa dokładniej niż algorytmy poprzednio wypracowane, który program (bądź usługa w przypadku zastosowania dla usług chmurowych) odpowiada za dokładnie które serie pików obciążenia. *Extract-PSG* wykrywa anomalie w postaci zbyt wysokiego obciążenia lub braku wystąpienia danej serii pików. W przypadku braku sezonowości w danych, metoda którą autor proponuje jest w stanie wskazać charakterystyki dla typowych wartości obciążenia i piki, które mogą wskazywać na możliwość wystąpienia anomalii. Algorytm *Extract-PSG* ma również ciekawe rozszerzenie pozwalające na generację pewnych statystyk mierników wydajności (rozd. 4.2.2), co jest przydatne do wyznaczania cech charakterystycznych profili operacyjnych badanych systemów. Autor również rozpatrywał problem wyboru parametrów do monitorowania.

Analiza korelacji pomiędzy logami może prowadzić do lepszego ustalenia zagrożeń wydajnościowych. W tym celu autor rozszerzył swoje badania o analizę dzienników procesów. Dziennik procesów rejestruje czy i kiedy dany proces spełnia pewien z góry ustalony warunek, na przykład minimalny czas wykonania procesu lub przekroczenie poziomu zajętej pamięci. Dziennik procesów składa się z szeregu wpisów przechowujących znacznik czasowy, nazwę procesu oraz argumenty wywołania procesu. Autor zaproponował oryginalne algorytmy (opisane w Rozdziale 5 rozprawy) które na podstawie znalezionych korelacji pomiędzy zapisami w dziennikach zdarzeń i procesów pozwalają na skuteczniejsze predykcje anomalii i potencjalnych problemów.

### **Eksperymentalna ewaluacja zaproponowanych rozwiązań**

Autor uzasadnił proponowane metody na gruncie teorii w sposób jasny i przekonywujący. Ostatecznym testem dla metod jest zawsze praktyka. Autor dokonał obszernej eksperymentacji przy użyciu serwerów w celu ewaluacji proponowanych metod. Ewaluacja została wykonana poprawnie. Skala eksperymentów jest odpowiednio dostosowana do skali problemu, tak aby jej wyniki bez zastrzeżeń uznać za poprawne.

### **Oryginalność i użyteczność zaproponowanych rozwiązań**

Rozprawa doktorska przedstawiona przez autora pokrywa szerszy zakres analizowanych danych niż to miało miejsce w poprzednich rozwiązaniach opublikowanych zarówno przez autora jak i innych badaczy. Co więcej, proponowana analiza nie ogranicza się do konkretnego systemu, i dokonuje korelacji informacji pochodzących z wielu źródeł, co również nie było dostatecznie uwzględniane we wcześniej opublikowanych pracach. Trzeba zaznaczyć że

zaproponowany przez autora algorytm *Extract-PSG* służący do identyfikacji cyklicznie występujących serii pików prezentuje szczególnie nowatorskie spojrzenie w porównaniu ze wcześniejszymi metodami analizy szeregów czasowych. W szczególności, należy zwrócić uwagę na oryginalne algorytmy z rozdz. 3.3 i 3.4 oraz 4.2 (wyspecyfikowane w pseudokodzie) które też były zaimplementowane w opracowanych przez autora narzędziach. Ten wkład należy uznać za szczególnie oryginalny i znaczący w dorobku autora.

W odróżnieniu od poprzednich rozwiązań które były wypracowane dla konkretnych dzienników, metody zaproponowane przez autora można zastosować do dowolnych dzienników spełniających pewne ogólne charakterystyki. Rokuje to łatwość wykorzystania proponowanych metod w wielu kontekstach, jak i wypracowanie wyspecjalizowanych algorytmów dopasowanych do szczególnych typów dzienników na bazie proponowanych rozwiązań.

Autor opublikował wyniki badań w prestiżowych wydawnictwach i wygłosił komunikaty o nich na międzynarodowych konferencjach. Na szczególne wyróżnienie zasługują publikacje 45, 47-49 (odnośniki do spisu Literatury na końcu rozprawy).

Metody wypracowane przez autora otwierają możliwości dalszych badań. Myślę że publikacje autora które dokumentują te metody będą szeroko cytowane. Ponadto pewne fragmenty (np. dotyczące opracowanych algorytmów) zasługują na kolejne publikacje.

### **Słabe strony pracy**

Pierwszy paragraf na stronie 12, w omówieniu układu pracy, mógłby być skrócony albo przeniesiony w inne miejsce rozprawy, omawiającej streszczenie i zakres badań.

W Rozdziale 1 w sposób ogólny i w końcowych częściach Rozdziałów 3 i 4 można by bardziej szczegółowo wyjaśnić w jaki sposób zaproponowane przez autora rozwiązania ulepszają wcześniej stosowane metody.

Eksperymentalna ewaluacja proponowanych metod znajduje się w pod-rozdziale 5.2.2. Zręcznie byłoby wyodrębnić tę analizę jako osobny rozdział tak aby ten ważny element rozprawy był lepiej widoczny.

Praca napisana jest dobrą polszczyzną i starannie edytowana, jedynie dwa pierwsze zdania w trzecim paragraf na str. 72 zaczynającym się od „W sekcji 4.2” wymaga przereformułowania tak aby zwiększyć ich czytelność.

### **Podsumowanie**

Rozprawę charakteryzuje nowatorstwo proponowanych rozwiązań, wysoki potencjał praktycznych zastosowań i inspiracji dalszych badań nad wiarygodnością systemów programowych. Materiał jest dobrze zorganizowany i sama rozprawa napisana w sposób przystępny, z wystarczającą dozą detali i przykładów umożliwiającym zrozumienie przedstawianych metod i ich krytyczną ocenę.

W związku z powyższym, zaliczam rozprawę do kategorii:

**e) Wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie**

