

## **R e c e n z j a**

rozprawy doktorskiej mgra Michała H o r o d e l s k i e g o pt. *Wyznaczanie reprezentatywnego fragmentu współdziałania systemu obiektów*

Niniejsza recenzja została przygotowana w odpowiedzi na pismo IPI PAN-RN 24/2019 z 24 czerwca 2019 r. przesłane przez prof. Jana Mielniczuka, zastępcę dyrektora ds. naukowych Instytutu Podstaw Informatyki Polskiej Akademii Nauk (IPI PAN) w Warszawie, w związku z powołaniem mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej w przewodzie doktorskim mgra Michała Horodelskiego w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie informatyka przez Radę Naukową IPI PAN w Warszawie.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska została wykonana w Katedrze Technologii Społeczeństwa Informacyjnego na Wydziale Matematyki, Informatyki i Architektury Krajobrazu Katolickiego Uniwersytetu Lubelskiego Jana Pawła II w Lublinie. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. Józef Winkowski z IPI PAN w Warszawie, wybitny matematyk zajmujący się współcześnie modelami matematycznymi współbieżnych i rozproszonych procesów przetwarzania informacji, a promotorem pomocniczym jest natomiast dr Piotr Filipkowski, pracujący w Szkole Głównej Handlowej w Warszawie.

Problematyka rozprawy doktorskiej odnosi się do systemów współbieżnych, tzn. systemów złożonych z asynchronicznie działających procesów, komunikujących się między sobą w celu wymiany informacji albo zsynchronizowania wykonywanych akcji. Modele sieciowe, znane również jako sieci Petriego, są formalnym modelem takich systemów, szczególnie wygodnym dla przedstawiania synchronizacji oraz komunikacji procesów. Do oceny wydajności modelowanych systemów, w modelach takich trzeba dodatkowo uwzględniać czynnik czasu trwania modelowanych akcji. Modele sieciowe z dołączonym czynnikiem czasu są nazywane modelami sieciowymi z czasem. Okazuje

się, że takie modele sieciowe mogą reprezentować szeroką klasę systemów dyskretnych, takich jak systemy informacyjne, systemy wieloprocesorowe, systemy komunikacyjne, systemy produkcyjne, rozproszone bazy danych i wiele innych. Analiza modeli sieciowych z czasem może być przeprowadzona na podstawie przestrzeni stanów albo w oparciu o własności strukturalne modeli. Metody symulacyjne są jeszcze innym rozwiązaniem w przypadkach, gdy wymagane własności strukturalne nie są spełnione, a przestrzeń stanów jest albo nieskończona, albo zbyt duża dla praktycznej analizy.

Tworzenie systemów współbieżnych jest zadaniem niezwykle trudnym, w związku z tym niemal od samego początku powstania informatyki rozważa się różne modele matematyczne takich systemów. Od szeregu lat w wielu instytutach badawczych i uczelniach na świecie oraz w Polsce prowadzone są intensywne badania naukowe związane z nowymi modelami sieciowymi systemów współbieżnych. Mimo ogromnych wysiłków wielu osób i zespołów naukowo-badawczych zajmujących się tą problematyką, żaden z zaproponowanych dotąd modeli systemów współbieżnych, w tym sieciowych, nie ma cech uniwersalności. To uzasadnia potrzebę prowadzenia dalszych wyężonych prac badawczych w tym kierunku.

Rozprawa doktorska M. Horodelskiego dotyczy metod opisu i analizy działania systemów współbieżnych przy wykorzystaniu tzw. kontekstowych sieci Petriego z czasem (w rozprawie używa się terminu czasowo-kontekstowe sieci Petriego). Kontekstowe sieci Petriego z czasem to modele systemów współbieżnych z akcjami zależnymi od kontekstu i czasu. Formalnie są to sieci Petriego z dodatkowymi łukami prowadzonymi od miejsc do tranzycji zwanymi łukami czytania. Dodatkowo w tym modelu przyjmuje się, że obserwowane są przedziały czasu pojawienia się i usuwania znaczników (żetonów) w miejscach, z których wychodzą łuki. Łuki czytania dochodzące do tranzycji uzależniają odpalenie (wykonanie) tej tranzycji od obecności znaczników w miejscach będących początkiem takich łuków. Łuki czytania nie usuwają znaczników ze swoich miejsc po odpaleniu tranzycji. Znaczniki, które muszą być obecne w miejscach łuków czytania odgrywają rolę kontekstu niezbędnego do odpalenia tranzycji. Znacznik może należeć do kontekstów wielu tranzycji, ale nie wstrzymuje on możliwości jednoczesnego odpalenia takich tranzycji. W rozprawie dla systemów współbieżnych reprezentowanych przez takie modele zdefiniowano ich zachowania i zbadano własności tych zachowań. Główny problem badawczy rozważany w rozprawie doktorskiej polega na znajdowaniu tych własności modeli systemów współbieżnych reprezentowanych za

pomocą kontekstowych sieci Petriego z czasem, które umożliwiają wskazanie skończonego odcinka początkowego rozwinięcia modelu wraz z ograniczeniami czasów odpalania tranzycji, pozwalające wyznaczyć wszystkie rozgałęzione procesy czasowe modelowanego systemu, a także na opracowaniu algorytmu rozstrzygnięcia czy dany model systemu ma pożądane własności i w przypadku odpowiedzi pozytywnej, algorytm winien wyznaczyć odpowiedni skończony odcinek początkowy rozwinięcia modelu i dotyczące go ograniczenia czasów odpalania tranzycji związanych z tym odcinkiem. W rozprawie zaproponowano rozwiązanie tego problemu dla kontekstowych sieci Petriego z czasem opisywanych w logice modalnej, a także dla wybranych podobnych modeli opisywanych w logikach temporalnych czasu rzeczywistego, znanych z literatury przedmiotu. W szczególności w rozprawie zaprezentowano dwa algorytmy generowania reprezentatywnego fragmentu przestrzeni stanów (o ile taki istnieje), zidentyfikowano własności możliwe do opisanego w logice modalnej przy pomocy stosownych formuł oraz opracowano algorytmy weryfikujące te własności. Zaletą proponowanego rozwiązania jest formalny opis poprawności jego działania wraz z analizą złożoności czasowej, a także eksperymentalnym porównaniem tego rozwiązania z metodami zaimplementowanymi w narzędziu TAPAAL, wykonanym w Uniwersytecie Aalborgu w Danii. TAPAAL jest przeznaczony do modelowania i analizy systemów współbieżnych z użyciem sieci Petriego z czasem.

Z literatury przedmiotu wiadomo, że nie jest znane satysfakcjonujące rozwiązanie rozważanego w rozprawie problemu. Z tych względów ważne jest, zarówno z praktycznego jak i poznawczego punktu widzenia, dalsze poszukiwanie skalowalnych i efektywnych jego rozwiązań.

W świetle powyższych uwag główny problem recenzowanej rozprawy należy uznać za aktualne, ważne zagadnienie naukowe, mogące stanowić przedmiot rozprawy doktorskiej z zakresu informatyki.

Rozprawa doktorska liczy 119 stron. Rozpoczyna ją streszczenie w języku polskim i angielskim, oraz wstęp, gdzie zamieszczona jest informacja o głównym problemie badawczym, istocie jego rozwiązania oraz strukturze organizacyjnej rozprawy. Rozdział 1 zawiera formalny opis modelu dyskutowanego w rozprawie, intuicyjne jego sformułowanie, tezę, pytania badawcze oraz omówienie związku rozważanego modelu z dwoma znanymi w literaturze odmiennymi pojęciami sieci Petriego z czasem. Są to

tw. Timed Petri Nets wprowadzone przez B. Waltera oraz Time Petri Nets zaproponowane przez P.M. Merlina. W rozdziale 2 opisano znane rozwiązanie problemu wyznaczania reprezentatywnego odcinka początkowego zachowania dla modelu sieci Petriego z przedziałami czasu i obecnością stoperów i parametrów z ograniczeniem cech modelu do sieci Petriego z czasem wg Merlina (ang. Parametric Stopwatches Petri Nets). Rozdział 3 dotyczy opisu znanej metody dyskretyzacji przestrzeni stanów zachowania systemu na przykładzie modelu systemu tranzycyjnego z czasem (ang. Timed Transition System) oraz metody weryfikacji własności systemu opisanych formułami logiki temporalnej z rozgałęzioną strukturą czasu (ang. Timed Computational Tree Logic). Rozdział 4 przedstawia rozwiązanie głównego problemu badawczego. W szczególności są tu opisane dwa algorytmy konstruowania reprezentatywnego fragmentu zachowania. Jeden z nich dotyczy konstruowania fragmentu rozgałęzionego procesu czasowego, a drugi – konstruowania fragmentu grafu stref (przez dyskretyzację). Zarówno rozgałęziony proces czasowy systemu, jak również system tranzycyjny z czasem reprezentujący semantykę kontekstowych sieci Petriego z czasem służą jako reprezentatywne fragmenty zachowania, które dalej stanowią podstawę weryfikowania własności modelowanego systemu. W tym samym rozdziale podane są również dwa twierdzenia poprawności działania opracowanych algorytmów wraz z dowodami. W rozdziale 5 zamieszczono oszacowanie złożoności czasowej algorytmu generującego graf stref oraz opisano oryginalne algorytmy zaproponowane przez doktoranta i przeznaczone do weryfikacji własności modelu systemu z wykorzystaniem logiki temporalnej ukierunkowanej na kontekstowe sieci Petriego z czasem wraz z analizą ich złożoności czasowej. Rozdział 6 zawiera opis zastosowania proponowanych metod do badania modelu konkretnego systemu z użyciem ich implementacji w obiektowym języku programowania Java 9. Przykłady zastosowań proponowanych metod do wybranych modeli systemów wraz z wynikami eksperymentów opisano w rozdziale 6 i załącznikach A i B. Zasadniczą część rozprawy kończy poszerzone podsumowanie uzyskanych wyników z informacją na temat potencjalnych kierunków dalszych prac badawczych oraz spis literatury zawierający 50 pozycji.

Do najważniejszych wyników prezentowanych w rozprawie zaliczam:

1. Opracowanie algorytmu generowania prefiksu rozgałęzionego procesu czasowego reprezentującego zachowanie systemów opisywanych za pomocą kontekstowych sieci

Petriego z czasem wraz z dowodem poprawności działania i oszacowaniem jego złożoności czasowej.

2. Opracowanie algorytmu generowania prefiksu systemu tranzycyjnego z czasem reprezentującego zachowanie systemów opisywanych za pomocą kontekstowych sieci Petriego z czasem z wykorzystaniem znanego algorytmu generowania grafu stref dla systemów opisywanych przez sieci Petriego z czasem wraz z dowodem poprawności działania i oszacowaniem jego złożoności czasowej.

3. Zaproponowanie algorytmów weryfikacji własności modelu systemu w celu oceny jakości proponowanego rozwiązania wraz z ich komputerową implementacją.

4. Zaprojektowanie i wykonanie własnego pakietu oprogramowania umożliwiającego przeprowadzanie badań w postaci analizy porównawczej proponowanego w rozprawie rozwiązania z rozwiązaniem dostępnym w narzędziu TAPAAL.

Zarówno uzyskane wyniki teoretyczne jak i przeprowadzone eksperymenty z użyciem własnego oprogramowania i narzędzia TAPAAL realizują w pełni główny cel pracy, są niebanalne i oryginalne. Lektura rozprawy przekonała mnie, że doktorant zna i rozumie tematykę, którą się zajął. Wydaje się, że warto w tym miejscu podkreślić i to, że tematyka ta nie należy do łatwych. Doktorant potrafi ponadto ściśle formułować swoje myśli, poprawnie i samodzielnie rozwiązywać trudne problemy naukowe oraz logicznie i przejrzysto przedstawiać rezultaty swych badań.

Rozprawa w ogólnym zarysie jest napisana poprawnie pod względem merytorycznym i językowym. Strona redakcyjna pracy nie budzi zastrzeżeń. Pewne uwagi szczegółowe dotyczące tych aspektów rozprawy prezentuję poniżej.

Z uwag krytycznych wymienię następujące:

1. W rozprawie brakuje mi przekonujących i bardziej wyczerpujących rozważań o praktycznej przydatności i skalowalności proponowanych metod, rozumianych jako zdolność do sprawnego ich działania w warunkach stale rosnącego rozmiaru modelu systemu. Eksperymenty symulacyjne i porównawcze z narzędziem TAPAAL zostały wykonane i opisane dla modeli o stosunkowo małych rozmiarach, wyrażanych za pomocą parametrów przyjętych w analizie złożoności czasowej proponowanych algorytmów (algorytm 4 i 5, rozdział 4).

2. Zarówno przegląd dostępnych modeli sieci Petriego z czasem, jak również próba ustosunkowania się do innych modeli sieciowych z czasem - z punktu widzenia proponowanych metod - są zbyt zawężone do zaledwie kilku modeli z czasem znanych z literatury przedmiotu. Brak mi we wstępie i spisie literatury choćby drobnej wzmianki o np. modelach stochastycznych, czy też rozmytych z czasem. Jest ich dość sporo i znalazły one w wielu przypadkach praktyczne zastosowanie.

3. W definicji kontekstowej sieci Petriego z czasem (definicja 1) brak jest pewnych założeń dotyczących relacji C i F. Ponieważ łuki czytania (elementy zbioru C) są nieskierowane, w odróżnieniu od łuków zwykłych (elementów zbioru F), które są łukami skierowanymi (są to pary uporządkowane miejsce – tranzycja, lub odwrotnie), należałoby przyjąć, że relacja odwrotna  $C^{-1}$  jest również rozłączna z F. Dodatkowo w tej definicji należałoby założyć, że każda tranzycja powinna mieć zarówno niepusty zbiór miejsc wejściowych, jak też niepusty zbiór miejsc wyjściowych. Wynika to z roli jaką one pełnią w tym modelu.

4. Opis kontekstowej sieci Petriego z czasem w przykładzie 1 jest niekompletny, ponieważ w podpisie rysunku 1 jest mowa o modelu kontekstowej sieci Petriego z czasem (definicja 1). W reprezentacji graficznej tej sieci brak zaznaczonego znakowania początkowego sieci, a w tekście opisującym ten model sieciowy pominięto również informacje na temat łuków czytania, a także to, które miejsca zawierają znaczniki w znakowaniu początkowym sieci, a które nie.

5. Doktorant posługuje się zbyt dużą liczbą skrótów nazw pojęć w tekście rozprawy. Takie podejście na pewno nie ułatwia, a raczej utrudnia, sprawne czytanie tekstu rozprawy. Ponadto dla lepszej czytelności tekstu i większej przejrzystości rozprawy jako całości dobrze byłoby rozpoczynać każdy rozdział od nowej strony. W rozprawie znalazłem również nieliczne literówki i/lub niezręczności językowe, jak np.: s. 21, wiersz 13 od góry; tamże, wiersz 18 od góry; s. 41, wiersz 18 od dołu; s. 97, wiersz 11 od dołu.

Są to tylko kwestie techniczne dotyczące możliwości lepszego i pełniejszego uwypuklenia rezultatów badawczych prezentowanych w rozprawie lub udoskonalenia prezentacji tekstu, które w żadnym razie nie obniżają wysokiej merytorycznej wartości rozprawy.

**Podsumowanie.** Koncepcja rozprawy doktorskiej mgra Macieja Horodelskiego jest nowatorska i aktualna, wyniki są wartościowe, logiczne, dobrze udokumentowane,

opublikowane lub przyjęte do opublikowania w Rocznikach Naukowych SGH w Warszawie lub Pracach Naukowych Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu. Doktorant wspomina również w wykazie literatury o pracy, przygotowanej do opublikowania w czasopiśmie zagranicznym „Expert Systems with Applications” z listy A MNiSW z liczbą punktów 140 i Impact Factor równym 4.292. Pierwszoplanowa pozycja w pięciu publikacjach cytowanych w wykazie literatury rozprawy doktorskiej dodatkowo podkreśla indywidualny wkład doktoranta do badań związanych z przedmiotem niniejszej rozprawy na każdym etapie ich realizacji.

**Wniosek końcowy:**

W mojej opinii przedłożona do oceny rozprawa doktorska mgr Michała Horodelskiego spełnia wszystkie wymagania określone w art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, z późniejszymi zmianami, i w związku z tym wnoszę do Rady Naukowej IPI PAN w Warszawie o kontynuowanie postępowania o nadanie M. Horodelskiemu stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie informatyka.

*Zbigniew Suraj*