

dr hab. Bożena Woźna-Szcześniak, prof. UJD  
Uniwersytet Humanistyczno-Przyrodniczy  
im. Jana Długosza w Częstochowie  
ul. Waszyngtona 4/8, 42-200 Częstochowa

# RECENZJA

rozprawy doktorskiej

**Tytuł rozprawy: Wyznaczanie reprezentatywnego fragmentu  
współdziałania systemu obiektów**

**Autor rozprawy: mgr Michał Horodelski**

**Recenzja wykonana jest na zlecenie Rady Naukowej Instytutu Podstaw Informatyki PAN,  
pismo z dnia 24 czerwca 2019r.**

Recenzowana rozprawa doktorska napisana została pod kierunkiem promotora Prof. dr hab. Józefa Winkowskiego (Instytut Podstaw Informatyki, Polskiej Akademii Nauk) oraz promotora pomocniczego dra Piotra Filipkowskiego (Szkoła Główna Handlowa w Warszawie). Praca lokuje się w dziedzinie nauk technicznych dyscyplinie informatyka.

1. *Cel, zakres i charakter rozprawy.*

Rozprawa doktorska mgra Michała Horodelskiego dotyczy metod opisu i analizy działania systemów współbieżnych. Rozważanym modelem systemów współbieżnych jest kontekstowa czasowa sieć Petriego zwana modelem c-TdPN (ang. contextual Timed Petri Net).

Sieci Petriego to jeden z najbardziej znanych formalizmów, który umożliwia modelowanie oraz weryfikację systemów współbieżnych i rozproszonych. Sieci Petriego w jasny i szczegółowy sposób modelują takie pojęcia, jak współbieżność, przyczynowość, czy niezależność. Jednakże klasyczne sieci Petriego nie są odpowiednie do modelowania równoczesnego dostępu do odczytu współdzielonych zasobów. Typowy sposób przedstawienia takiej sytuacji przy użyciu standardowej sieci Petriego to wykorzystanie tzw. pętli konsumpcyjno-produkcyjnej: każda akcja w razie potrzeby może zużyć wspólny zasób i od razu go zregenerować. Niestety takie podejście może spowodować, że np. techniki rozwijania sieci (ang. unfolding technique) będą nieefektywne. *Sieci kontekstowe* jawnie modelują równoczesny dostęp do odczytu i rozwiązują ten problem. Sieci kontekstowe rozszerzają sieci Petriego, również czasowe sieci Petriego, o luki czytania, przez co pozwalają akcji sprawdzić obecność zasobu bez jego zużywania.

Teza rozprawy jest jasno i precyzyjnie sformułowana przez Autora, i brzmi następująco:

- znaleźć te własności modeli c-TdPN, przy których istnieje skończony fragment początkowy rozwinięcia modelu i dotyczące tego fragmentu ograniczenia momentów wykonania tranzycji, które wyznaczają wszystkie rozgałęzione procesy czasowe modelowanego systemu.
- opracować algorytm rozstrzygania czy dany model systemu ma wspomniane wyżej własności oraz algorytm wyznaczania odpowiedniego odcinka początkowego i dotyczących go ograniczeń, jeśli takie istnieją.

Na poparcie swojej tezy Autor zaproponował dwa następujące algorytmy konstruujące reprezentatywny fragment przestrzeni stanów:

- algorytm generowania prefiksu rozgałęzionego procesu czasowego (RPC) reprezentującego zachowanie systemów c-TdPN; przedstawiono dowód poprawności tego algorytmu oraz zbadano jego złożoność czasową.
- algorytm generowania prefiksu czasowego systemu tranzycyjnego (TTS) reprezentującego zachowanie systemów c-TdPN z inwariantami w oparciu o istniejący algorytm generowania grafu stref dla systemów TPN; przedstawiono dowód poprawności generowania prefiksu TTS przez ten algorytm oraz zbadano jego złożoność czasową. Ponadto, zastosowano znane aproksymacje  $k$ ,  $k_x$  i  $LU_x$ , aby osiągnąć reprezentatywny fragment zachowania (warunek stopu algorytmu).

Ponadto, Autor zaproponował sposób wyznaczania TTS do określonego momentu  $d$ , opracował algorytmy weryfikacji własności typu  $EF_I\varphi$ ,  $EG_I\varphi$ ,  $AF_I\varphi$ ,  $AG_I\varphi$ ,  $AG_I(\psi \Rightarrow EF_I\varphi)$  i  $AG_I(\psi \Rightarrow AF_I\varphi)$ , zaimplementował algorytm generowania zdyskretyzowanego TTS dla c-TdPN w postaci biblioteki TdPNBib oraz porównał swoje narzędzie TdPNBib z istniejącym narzędziem TAPAAL.

Ponieważ rozprawa ma rozbudowaną zarówno stronę analityczną jak i praktyczną, a wyniki opisane w pracy bazują na znajomości i umiejętności stosowania metod formalnych oraz wyspecjalizowanych języków/środowisk programistycznych, pracę zaliczam do rozpraw o charakterze teoretyczno-praktycznym.

2. *Struktura i zawartość rozprawy.* Opiniowana rozprawa doktorska została przygotowana w języku polskim i składa się ze wstępu, sześciu rozdziałów, zakończenia oraz dwóch dodatków. Zawiera ponadto stronę tytułową, streszczenia w językach polskim i angielskim, stronę z podziękowaniami, spis treści, spis rysunków, spis tabel oraz bibliografię. Praca liczy łącznie 119 stron. Bibliografia obejmuje 50 pozycji, w tym pozycje książkowe, artykuły w czasopismach naukowych oraz recenzowanych materiałach konferencyjnych, a także artykuły z bazy [arXiv.org](https://arxiv.org). Treść poszczególnych rozdziałów daje syntetyczny pogląd na przedstawioną w nich zawartość merytoryczną. W szczególności:

- Rozdział 1 zawiera opis modelu c-TdPN, problem który ma być rozwiązany, tezę i pytania badawcze oraz związek wybranego modelu z innymi znanymi modelami. W szczególności, Podrozdział 1.1 zawiera formalną definicję modelu c-TdPN i jej wyjaśnienie na przykładzie *Platformy Modelowania i Symulacji LabTSI(R)*. Następnie zawiera formalną definicję *rozgałęzionego procesu czasowego*(RPC), który reprezentuje zachowanie modelu c-TdPN, i jej wyjaśnienie na przykładzie wspomnianej wcześniej platformy, ale z ograniczeniem do dwóch węzłów/komputerów. Na koniec Podrozdziału 1.1 Autor definiuje problem badawczy, którego dotyczy rozprawa, uzasadnia jego wybór i krótko charakteryzuje proponowane rozwiązanie postawionego problemu badawczego. Podrozdział 1.2 przedstawia związek modelu c-TdPN z dwoma innymi czasowymi sieciami Petriego:
  - Timed (Arc) Petri Net (TdPN or TAPN) – czasową siecią Petriego z ograniczeniami czasowymi dla łuków oraz wiekiem dla żetonów;
  - Parametric Stopwatches Petri Net (PSwPN) – przedziałową siecią Petriego z obecnością stoperów i parametrów.

Każda wprowadzona w tym podrozdziale definicja została zilustrowana na przykładzie *Platformy Modelowania i Symulacji LabTSI(R)* z ograniczeniem do dwóch węzłów/komputerów. Dodatkowo, w Podrozdziale 1.2 wprowadzono *czasowy system tranzycyjny* (TTS) jako drugi model reprezentujący zachowanie modelu c-TdPN, TdPN oraz PSwPN.

- Rozdział 2 zawiera opis znanych metod modelowania zachowania dla sieci PSwPN. Rozważane modele zachowania sieci biorą pod uwagę dwa aspekty: strukturalny (Podrozdział 2.1) i czasowy (Podrozdział 2.2). Aspekt strukturalny charakteryzuje elementy składowe zachowania i połączenia przyczynowe pomiędzy nimi. Aspekt czasowy charakteryzuje relacje

między akcjami systemu oraz momenty wystąpienia akcji w zachowaniu w odniesieniu do momentu zainicjowania systemu. Podrozdział 2.4 opisuje sposób wyznaczania reprezentatywnego fragmentu (tzw. prefiksu zupełnego) zawierającego wszystkie uruchomienia umożliwionych tranzycji dla przedziałowej sieci Petriego bez stoperów i parametrów (tj. dla sieci TPN). Wszystkie prezentowane metody zostały zilustrowane na przykładzie Platformy Modelowania i Symulacji LabTSI(R), ale z ograniczeniem do jednego węzła.

- Rozdział 3 wprowadza czasowy system tranzycyjny (TTS) jako model zachowania dla przedziałowej sieci Petriego bez stoperów i parametrów (tj. dla sieci TPN) oraz opisuje znaną metodę dyskretyzacji przestrzeni stanów dla tego modelu wykorzystującą pojęcie *strefy (regionu)*. Dyskretyzacja przestrzeni stanów ma na celu umożliwienie automatycznej weryfikacji modelowej, w której własności systemu opisywane są przy pomocy logik temporalnych. Ponadto w Podrozdziale 3.2 przedstawiono znaną metodę automatycznej weryfikacji modelowej dla sieci TPN, których modelem zachowania jest TTS, a własności opisywane są wybranymi formułami logiki TCTL. Syntaktyka rozważanej w rozprawie logiki TCTL jest zdefiniowana z wykorzystaniem formuł GMEC (ang. General Mutual Exclusion Constraint) orzekających czy w danym stanie, przy danym znakowaniu, system sieciowy ma odpowiednią liczbę żetonów w odpowiednich miejscach; część temporalna jest definiowana standardowo. Semantyka TCTL definiowana jest w stanach modelu TTS definiowanego dla TPN.
- Rozdział 4 zawiera opis dwóch proponowanych przez autora rozprawy algorytmów konstruowania reprezentatywnego fragmentu (prefiksu zupełnego) zachowania modeli c-TdPN. W szczególności, Podrozdział 4.2 prezentuje algorytm konstruowania fragmentu rozgałęzionego procesu czasowego, zawiera dowód poprawności tego algorytmu oraz analizę jego złożoności czasowej. Podrozdziały 4.3 i 4.4 przedstawiają algorytm konstruowania fragmentu grafu stref dla c-TdPN z inwariantami wraz z dowodem jego poprawności. Podrozdział 4.5 definiuje semantykę dla TCTL w stanach modelu TTS definiowanego dla c-TdPN.
- Rozdział 5 najpierw zawiera opis proponowanych algorytmów weryfikacji wybranych formuł logiki TCTL z semantyką definiowaną w stanach modelu TTS definiowanego dla c-TdPN. Należą do nich formuły typu:  $EF_I\varphi$ ,  $EG_I\varphi$ ,  $AF_I\varphi$ ,  $AG_I\varphi$ ,  $AG_I(\psi \Rightarrow EF_I\varphi)$ ,  $AG_I(\psi \Rightarrow AF_I\varphi)$ . Następnie w Podrozdziale 5.2 przeprowadzono analizę złożoności czasowej algorytmu generującego graf stref (TTS), tj. algorytmu opisanego w Podrozdziale 4.3. W kolejnych podrozdziałach (5.3, 5.4) przeprowadzono analizę złożoności czasowej algorytmów weryfikacji wspomnianych wyżej wybranych formuł logiki TCTL.
- Rozdział 6 zawiera opis badań symulacyjnych przeprowadzonych przy pomocy narzędzia TdPNBib (wykonane przez Autora rozprawy) oraz konkurencyjnego narzędzia TAPAAL dla klasycznego problemu synchronizacji dostępu do danych, tj. problemu uczujących filozofów. Badania symulacyjne obejmują:
  - analizę wybranych własności opisanych przy pomocy TCTL w różnych wariantach modelu systemu.
  - analizę przydatności miejsc odczytu.
  - analizę porównawczą reprezentatywnych przestrzeni stanów wygenerowanych przez TdPNBib i TAPAAL.
  - badanie eksperymentalne własności  $EF_I\varphi$  algorytmu konstruowania modelu TTS z dodatkowym warunkiem momentu stopu.
  - wpływ wybranej aproksymacji na weryfikację własności modelu systemu
  - analizę wpływu wzrostu parametrów modelu systemu na środowisko symulacyjne do konstruowania reprezentatywnego TTS.

Prezentacja materiału przedstawionego w pracy dokonana jest w sposób relatywnie poprawny z językowego punktu widzenia. W pracy trafiają się literówki i drobne błędy stylistyczne. Inne uwagi techniczno-redakcyjne przedstawiono w dalszej części recenzji.

3. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadczącej o dostatecznej wiedzy Autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Analiza literatury w zakresie metod formalnych dla sieci Petriego jest jednym z bardzo słabych punktów rozprawy, gdyż Autor potraktował ją bardzo pobieżnie. Może to świadczyć o niewielkich kompetencjach Autora w rozważanej dziedzinie.

Autor pominął m.in. następujące prace, które mogły mieć wpływ na rozwiązania proponowane w rozprawie:

- Loïc Jezequel, Thomas Chatain, Maurice Comlan, David Delfieu, Olivier H. Roux. *Pomsets and Unfolding of Reset Petri Nets*. 12th International Conference on Language and Automata Theory and Applications (LATA 2018), 2018.
  - P.A. Abdulla, M. Faouzi Atig, S. Krishna, and S. Vaidya. Verification of Timed Asynchronous Programs. <http://www.cse.iitb.ac.in/~krishnas/fsttcs2018.pdf>
  - Thomas Chatain, Stefan Haar, Maciej Koutny, Stefan Schwoon. *Non-atomic Transition Firing in Contextual Nets*. In proceedings of international conference on the Application and Theory of Petri Nets and Concurrency. Str. 117–136, Springer, 2015.
  - P. Baldan, A. Bruni, A. Corradini, B. König, S. Schwoon. *On the Computation of McMillan's Prefix for Contextual Nets and Graph Grammars*. In proceedings of the 5th International Conference on Graph Transformation (ICGT'10), Lecture Notes in Computer Science, str. 91–106, Springer, 2010, vol. 6372.
  - Joakim Byg and Kenneth Yrke Jørgensen and Jiri Srba. *An Efficient Translation of Timed-Arc Petri Nets to Networks of Timed Automata*. In proceedings of the International Conference on Formal Engineering Methods (ICFEM 2009). LNCS, tom 5885, 2009.
  - P. Baldan, A. Corradini, B. König, S. Schwoon. *McMillan's Complete Prefix for Contextual Nets*. Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency (ToPNOC). Str. 698-716 LNCS, tom 5100, str. 199-220 (2008).
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?

Oryginalność rozprawy polega na samodzielnym opracowaniu następujących wyników opisanych w rozdziałach 4 i 5:

- opracowaniu algorytmu generowania prefiksu rozgałęzionego procesu czasowego (RPC) reprezentującego zachowanie systemów c-TdPN; udowodnieniu jego poprawności oraz zbadaniu jego złożoności czasowej.
- opracowaniu algorytmu generowania prefiksu czasowego systemu tranzycyjnego (TTS) reprezentującego zachowanie systemów c-TdPN w oparciu o istniejący algorytm generowania grafu strefa dla systemów TPN; udowodnieniu jego poprawności oraz zbadaniu jego złożoności czasowej.
- opracowaniu algorytmu generowania TTS do określonego momentu  $d$ ,
- opracowaniu algorytmu weryfikacji własności typu  $EF_I\varphi$ ,  $EG_I\varphi$ ,  $AF_I\varphi$ ,  $AG_I\varphi$ ,  $AG_I(\psi \Rightarrow EF_I\varphi)$  i  $AG_I(\psi \Rightarrow AF_I\varphi)$  dla systemów c-TdPN oraz zbadaniu ich złożoności czasowej.
- implementacji algorytmu generowania zdyskretyzowanego TTS dla c-TdPN w postaci biblioteki TdPNBib .

Kwestia pozycji rozprawy w stosunku do istniejącego stanu wiedzy jest trudna do oceny, gdyż:

- najnowsza literatura cytowana w rozprawie jest z roku 2015; wyjątkiem jest praca Autora z roku 2018, ale ta wydana jest w języku polskim i dotyczy zastosowań sieci c-TdPN do

modelowania procesów decyzyjnych występujących w dziedzinie medycyny ratunkowej. W literaturze występują jeszcze dwie prace [22] i [28], ale są to publikacje planowane i w mojej ocenie nie powinny się znaleźć w spisie literatury.

- brak jest prac Autora dotyczących problemów badawczych poruszanych w rozprawie, które zostałyby już opublikowane w czasopismach lub materiałach konferencyjnych o zasięgu międzynarodowym.
- w żadnym miejscu rozprawy Autor nie dokonuje wnikliwej analizy cytowanych pozycji.

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

Autor we wstępie przedstawił nie tylko strukturę pracy, ale również zdefiniował problem badawczy oraz zapowiedział jak go będzie rozwiązywał. Rozdziały 1-3 zawierają wprowadzenie do postawionego problemu, opis modelu rozważanego w rozprawie i jego związek z innymi znanymi czasowymi modelami sieci Petriego, opis znanych rozwiązań postawionego problemu dla innego czasowego modelu sieci Petriego, które były niezbędne do rozwiązania postawionego problemu dla modelu c-TdPN. Rozdziały 4-5 zawierają opis proponowanego rozwiązania postawionego problemu wraz analizą jego poprawności i złożoności czasowej. Rozdział 6 zawiera wyniki symulacyjne. Szczegółowa zawartość rozdziałów została przedstawiona w punkcie 2 tej recenzji.

Autor przyjął prawidłowe założenia do realizacji pracy, rozwiązał postawiony problem stosując właściwe dla przedmiotu badań metody.

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

Jak już zostało napisane w punkcie 2 tej recenzji, rozprawa obejmuje 119 stron, dzieli się na wstęp, zakończenie, 6 rozdziałów prezentujących cel rozprawy i rozwiązujących postawione tezy, spis treści, bibliografię, spis rysunków, spis tabel oraz 2 załączniki. Treść pracy odpowiada tematowi określoneemu w tytule. Treść kolejnych rozdziałów stanowi logicznie powiązaną całość.

Struktura rozprawy wynika z przyjętego planu pracy oraz podporządkowana jest stopniowemu realizowaniu przyjętych celów. Prezentowane zagadnienia tworzą harmonijną całość, przez co autor rozprawy konsekwentnie realizuje zamierzone zadanie badawcze.

Rozprawa napisana jest poprawnie i przekonująco. Zastosowana terminologia i symbole nie budzą większych zastrzeżeń. Mylący jest jednak przedostatni akapit we wstępie, który prezentuje plan rozprawy. Autor pisze:

W rozdziale piątym zbadano złożoność czasową proponowanych algorytmów.

Tymczasem rozdział ten wprowadza algorytm weryfikacji własności i zawiera analizę złożoności tylko tych algorytmów. Ponadto jeśli chodzi o organizację rozprawy, to w mojej ocenie Podrozdział 4.5 powinien zostać przesunięty do Rozdziału 5, a Podrozdział 5.2 do Rozdziału 4. Wówczas rozdziały te stanowiłyby ładniejszą spójną całość.

Pod względem edytorskim oceniana rozprawa doktorska jest przeciętna:

- praca zawiera sporo "białych plam", które wynikają z nieprawidłowego zarządzania obiektami pływającymi.
- środowiska wyliczeniowe mają podwójne, a czasem wydaje się, że nawet większe odstępki, co w mojej ocenie nie wygląda dobrze.
- rysunki i definicje posiadają numerację globalną, co zmniejsza łatwość czytania rozprawy. W mojej ocenie powinny być numerowane zgodnie z rozdziałami, do których należą.
- rysunki powinny być prezentowane w tej samej skali – ograniczenia na Rysunku 5 są słabo czytelne.

- publikacja „[39] W. Penczek and A. Pólrola. Advances in verification of time petri nets and timed automata” nie zawiera ani wydawcy, ani roku wydania.

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

Do bardzo słabych punktów rozprawy należy przegląd literatury, o czym wspominałam już w punkcie recenzji poświęconym analizie źródeł. Dobrze zrobiony mógłby mocniej wyeksponować osiągnięcia Autora.

Wyniki prezentowane w rozprawie nie były opublikowane w renomowanych czasopismach naukowych posiadających współczynnik wpływu Impact Factor (IF), czy też materiałach konferencyjnych o zasięgu międzynarodowym, co jest kolejnym słabym punktem rozprawy.

Pomimo uwag, zawartych w tej części recenzji, z merytorycznego punktu widzenia rozprawa zasługuje na pozytywną ocenę.

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

W przeważającej części rozprawa dotyczy obszaru bliższego badaniom podstawowym. Możliwe jest jednak wykorzystanie proponowanych algorytmów konstruowania reprezentatywnego fragmentu zachowania modeli c-TdPN w procesie automatycznego weryfikowania rzeczywistych systemów współbieżnych modelowanych przy użyciu tego rodzaju sieci Petriego.

9. *Konkluzja*

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska dostatecznie spełnia wymagania Ustawy stawiane rozprawom doktorskim. Wniosuję zatem o dopuszczenie mgra Michała Horodelskiego do dalszych etapów postępowania w przewodzie doktorskim.

dr hab. Bożena Woźna-Szcześniak, prof. UJD

