

Dr hab. inż. Roman Stanisław Deniziak, prof. PŚk
Katedra Systemów Informatycznych
Politechnika Świętokrzyska
ul. 1000-lecia Państwa Polskiego 7
25-314 Kielce

Kielce, 8.12.2025

**Recenzja rozprawy doktorskiej dla Rady Naukowej Dyscypliny
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja
Uniwersytetu Zielonogórskiego**

Tytuł rozprawy: Analiza żywotności części sterującej systemu cyber-fizycznego specyfikowanej z zastosowaniem sieci Petriego

Autor rozprawy: mgr inż. Mateusz Popławski

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Remigiusz Wiśniewski

Promotor pomocniczy: dr inż. Grzegorz Bazydło

1. Cel, zakres, charakter i teza rozprawy

Tematyka rozprawy doktorskiej dotyczy analizy żywotności sieci Petriego. Analizując istniejące rozwiązania w tym zakresie Doktorant stwierdził, że brakuje wystarczająco efektywnych metod pozwalających na weryfikację czy dana sieć Petriego spełnia warunek żywotności. Problem ten jest istotny, ponieważ sieci Petri są często stosowanym, formalnym modelem części sterującej systemów cyber-fizycznych. Dlatego efektywne metody analizy sieci Petriego przyczynią się do zwiększenia skuteczności metod projektowania i walidacji współczesnych systemów, obejmujących interakcję części przetwarzającej dane ze światem fizycznym.

Praca obejmuje analizę istniejących rozwiązań z zakresu analizy sieci Petriego, wybór i implementację rozwiązania referencyjnego, oraz opracowanie i implementację autorskiej metody analizy żywotności sieci Petriego. Opracowana metoda obejmuje 4 etapy analizy takich sieci: poszukiwanie wzorców, badanie silnej spójności, redukcja sieci i weryfikacja żywotności. Na każdym etapie możliwe jest wykrycie warunku braku żywotności sieci co pozwala na eliminację niepotrzebnych obliczeń a przez to zwiększenie efektywności opracowanej metody.

Celem pracy było opracowanie efektywnej i skutecznej metody analizy żywotności części sterującej systemu cyber-fizycznego specyfikowanej z zastosowaniem sieci Petriego. Cel ten został określony w postaci następującej tezy pracy:

Możliwe jest przeprowadzenie analizy żywotności części sterującej systemu cyber-fizycznego specyfikowanej z zastosowaniem sieci Petriego w sposób efektywny oraz skuteczny.

gdzie: efektywność oznacza zdolność do wykonania analizy w zadany czas, a skuteczność oznacza uzyskanie poprawnego wyniku. Tak sformułowaną tezę można uznać za poprawną.

Praca ma charakter badawczo-eksperymentalny. W celu udowodnienia tezy Doktorant opracował nową metodę analizy żywotności sieci Petriego, a następnie oszacował teoretyczną złożoność obliczeniową metody oraz wykonał eksperymenty dla 246 sieci o różnej złożoności. Eksperymenty wykazały znacznie lepszą efektywność opracowanej metody w porównaniu z metodą referencyjną, średni czas obliczeń był 14 razy krótszy, dla wszystkich przykładów uzyskano także poprawną odpowiedź w zakresie żywotności sieci. Uzyskane wyniki stanowią eksperymentalny dowód tezy pracy.

2. Zawartość rozprawy

Rozprawa doktorska składa się z 7 rozdziałów, 2 dodatków, bibliografii oraz spisów skrótów, rysunków i tabel. Pierwszy rozdział zawiera wstęp stanowiący wprowadzenie do tematyki rozprawy. W rozdziale tym Autor przedstawił też motywację, cel i zakres oraz tezę pracy. Rozdział 2 obejmuje omówienie podstawowych zagadnień takich jak: systemy cyber-fizyczne, podstawowe pojęcia z teorii grafów, sieci Petriego, pojęcie złożoności algorytmu, a także zawiera przegląd istniejących metod analizy sieci Petriego, w szczególności w zakresie analizy żywotności. W rozdziale 3 Doktorant przedstawił referencyjną metodę weryfikacji żywotności sieci Petriego, stanowiącą punkt odniesienia dla metody będącej przedmiotem pracy. Rozdział 4 zawiera opis metody opracowanej w ramach pracy doktorskiej, stanowi on główną część pracy. W rozdziale 5 Autor przedstawił wybrane wyniki wykonanych eksperymentów. Eksperymenty zostały wykonane zarówno dla metody referencyjnej jak i zaproponowanej przez Doktoranta. Porównanie uzyskanych wyników stanowi jednocześnie eksperymentalny dowód tezy pracy. Rozdział 6 zawiera omówienie pięciu przykładów sieci Petriego, dla których uzyskano wyniki ilustrujące różne cechy prezentowanej metody. Na zakończenie, w rozdziale 7 przedstawiono podsumowanie, wnioski oraz kierunki dalszych prac. W dodatkach Autor przedstawił kompletne wyniki wykonanych eksperymentów oraz fragmenty kodu źródłowego implementacji opracowanych metod.

Zaproponowany układ rozprawy jest logiczny. Na wstępie Autor określił problem badawczy i przedstawił cel oraz tezę pracy. Następnie w kolejnych rozdziałach przedstawił poszczególne problemy badawcze, najpierw opisał aktualnie stosowane rozwiązanie a następnie opisał wynik własnych prac, jako opis opracowanych metod analizy sieci Petriego. Na zakończenie przedstawił wyniki wykonanych eksperymentów i wykazał słuszność tezy rozprawy.

Jedynym mankamentem zawartości rozprawy jest zbyt ogólny i pobieżny opis aktualnego stanu wiedzy w zakresie istniejących metod analizy żywotności sieci Petriego. Przede

wszystkim brakuje odniesienia do efektywności i skuteczności tych metod, a szczególnie porównania z opracowaną metodą.

3. Analiza źródeł

Bibliografia przedstawiona w rozprawie zawiera 105 pozycji, obejmujących głównie artykuły w czasopismach zagranicznych i referaty z konferencji międzynarodowych, z czego 11 pozycji to publikacje współautorskie Doktoranta.

Ponad 50% pozycji literatury są to publikacje z ostatnich 10 lat. Ale też znacząca część bibliografii są to starsze publikacje, wynika to z faktu, że Doktorant często odwołuje się do klasycznych rozwiązań z przed wielu lat, a tematyka sieci Petriego jest przedmiotem badań od ponad 60 lat.

Chociaż Autor odnosi się do stosunkowo nowych pozycji związanej z tematyką pracy, to jednak w bibliografii brakuje istotnych pozycji, między innymi takich jak:

- Dou, H., Zhou, M., Wang, S., & Albeshri, A. (2024). An efficient liveness analysis method for petri nets via maximally good-step graphs. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 54(7), 3908-3919.
- Qi, H., Wang, J., Yan, C., & Jiang, C. (2023). The probabilistic liveness decision method of unbounded Petri nets based on machine learning. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 54(2), 1070-1081.
- Uzam, M., Liu, D., Berthomieu, B., Gelen, G., Zhang, Z., Mostafa, A. M., & Li, Z. (2024). On Deadlock/Livelock Studies Based on Reachability Graph of Petri Nets by Using TINA. *IEEE Access*.

Pozycje te są blisko związane z tematyką pracy a nawet prezentują konkurencyjne rozwiązania, do których Doktorant powinien się odnieść.

Pomimo tego, że w pracy Autor odwołuje się do wielu klasycznych zagadnień z zakresu teorii grafów, brakuje również jakiejkolwiek pozycji z tej dziedziny. Brak odniesień do literatury przy przytaczaniu definicji pojęć zarówno z tematyki teorii grafów jak i innych sugeruje autorstwo tych definicji.

W pracy brakuje szerszego i aktualnego przeglądu literatury z zakresu tematyki pracy, szczególnie w odniesieniu do ostatnich 2 lat. Autor skupił się jedynie na metodach opartych na grafie osiągalności, a przedstawiony przegląd jest bardzo pobieżny i bardzo ograniczony.

4. Metodyka badań

Przyjęta przez Doktoranta metodyka badań jest poprawna. Biorąc pod uwagę rosnącą złożoność projektowanych systemów cyber-fizycznych, motywacją do podjęcia tematyki badań była potrzeba opracowania metody analizy żywotności o większej efektywności niż istniejące a także zwracającej poprawne wyniki dla szerszej klasy sieci Petriego, szczególnie dla sieci o dużej złożoności. Autor przyjął założenie, że metoda powinna bazować na grafie osiągalności, podobnie jak zdecydowana większość istniejących metod. Następnie, zaobserwowano, że głównym problemem w tych metodach jest proces tworzenia grafu osiągalności. Z jednej strony wykładnicza złożoność tego etapu powoduje dużą

czasochłonność obliczeń dla dużych sieci Petriego, a z drugiej strony może powodować tzw. eksplozję stanów. Dlatego w badaniach, w pierwszej kolejności Autor skupił się na szukaniu metod, które po pierwsze wyeliminują konieczność generowania grafu osiągalności dla sieci, w których można wykryć cechy świadczące o braku żywotności, a po drugie na możliwości redukcji sieci w taki sposób aby uprościć proces generowania grafu osiągalności. Badania te doprowadziły do opracowania metody o większej skuteczności i większej efektywności, co zostało potwierdzone licznymi eksperymentami i porównaniem uzyskanych wyników z metodą referencyjną.

Autor w metodyce badań przyjął, że metoda powinna bazować na grafie osiągalności. Takie założenie ma uzasadnienie na podstawie przeglądu literatury z tego zakresu. Jednak nie jest to wystarczające aby wykazać, że jest to postępowanie najlepsze. W tym celu należałoby się jednak odnieść też do innych rozwiązań i wykazać, że inne podejścia nie zapewnią uzyskania bardziej efektywnej metody.

W pracy Autor porównał swoją metodę z tzw. metodą referencyjną, która jest określona jako metoda klasyczna. Jednak brakuje wskazania jaka jest efektywność tej metody w odniesieniu do metod znanych z literatury. Brak takich informacji nie pozwala na odniesienie uzyskanych wyników do aktualnego stanu wiedzy tzn. w pracy nie wykazano, że opracowana metoda przewyższa pod względem efektywności istniejące metody.

5. Oryginalność uzyskanych wyników

Głównym wynikiem rozprawy doktorskiej jest opracowana autorska metoda analizy żywotności sieci Petriego. Metoda ta jest znaczącym rozszerzeniem metody klasycznej bazującej na tworzeniu grafu osiągalności. W swoim podejściu Autor wykorzystał kilka rozwiązań, uzyskanych w wyniku realizowanych badań i stanowiących oryginalne osiągnięcia pracy:

1. Opracowanie techniki wyszukiwania wzorców, które jednoznacznie wskazują na to, że sieć Petriego nie spełnia warunku żywotności. Techniki mają złożoność wielomianową i pozwalają na uniknięcie czasochłonnej analizy sieci, w których występują wyszukiwane typy wzorców.
2. Opracowanie metody badania silnej spójności sieci, która również ma złożoność wielomianową i eliminuje potrzebę czasochłonnej analizy sieci, które nie są silnie spójne, zatem nie spełniają warunku żywotności.
3. Opracowanie metody redukcji sieci. Redukcja sieci znacząco upraszcza proces generowania grafu osiągalności.
4. Opracowanie metody wyznaczania grafu pokrycia. Metoda jest modyfikacją klasycznego podejścia, ale usprawnioną w celu skrócenia czasu obliczeń.
5. Opracowano metodę badania żywotności sieci Petriego. Metoda ta też jest modyfikacją metody klasycznej.
6. Zaimplementowano opracowane metody w formie programu komputerowego analizującego sieci Petriego pod kątem ich żywotności.

W odniesieniu do aktualnego stanu wiedzy wyniki badań uzyskane przez Autora są innowacyjne. Wyżej wymienione osiągnięcia zostały wdrożone w formie pakietu oprogramowania.

6. Uwagi krytyczne, wady i słabe strony rozprawy

Oprócz wcześniej przedstawionych uwag dotyczących bibliografii i metodyki badań, wydaje się, że niektóre zagadnienia powinny być dokładniej przedyskutowane, wymagają wyjaśnienia lub uzupełnienia. Dotyczy to następujących problemów:

1. Temat pracy wskazuje na to, że problematyka pracy dotyczy systemów cyber-fizycznych. Tymczasem zakres pracy oraz opracowane metody dotyczą ogólnie analizy sieci Petri. Zatem powstaje pytanie co jest specyficznego w opracowanych metodach, że Autor odnosi je do systemów cyber-fizycznych a nie do dowolnych sieci Petri?
2. Autor nie podejmuje dyskusji dotyczącej optymalności opracowanych algorytmów. Czy np. Algorytm 3 lub Algorytm 4 można by jeszcze zoptymalizować? Skoro celem pracy jest uzyskanie jak największej efektywności to warto by przeanalizować możliwości optymalizacji opracowanych rozwiązań.
3. Wyniki wykonanych eksperymentów przedstawiono tylko dla 15 przykładów. Powstaje pytanie dlaczego akurat takie przykłady zostały wybrane. Ponadto brakuje głębszej analizy uzyskanych wyników. Brakuje odpowiedzi na pytania:
 - dla niektórych przykładów zaproponowana metoda jest wolniejsza od metody referencyjnej, dlaczego? Jaki jest powód dłuższego działania przedstawionej metody?
 - zaproponowana metoda może zakończyć działanie wcześniej tzn. po wykryciu wzorca, po wykryciu braku silnej spójności, lub po wykryciu nieograniczoności. Interesujące byłyby wyniki wskazujące dla poszczególnych przykładów na jakim etapie algorytm zakończył działanie.
 - brakuje opisu charakterystyki benchmarków. Czy zbiór jest reprezentatywny? Jak szeroką klasę systemów reprezentuje?
4. Autor stwierdził, że udowodnił tezę analitycznie oraz eksperymentalnie. Czy wykazana złożoność obliczeniowa rzeczywiście dowodzi analitycznie tezy pracy?
5. W kierunkach dalszych prac Autor wskazał, że jednym z potencjalnych kierunków może być wykorzystanie metod sztucznej inteligencji. Jakie metody Autor planuje zastosować?
6. Autor w pracy jako punkt odniesienia przedstawił metodę referencyjną opartą na tworzeniu grafu osiągalności. Jak się ma ta metoda to metod znanych z literatury. Dlaczego nie porównano opracowanej metody do metod znanych z publikacji?

Wyżej wymienione uwagi nie podważają wartości uzyskanych wyników badań i poprawności opracowanych rozwiązań. Ale omówienie tych zagadnień pozwoliłoby na lepszą ocenę uzyskanych wyników badań, lepsze zrozumienie zastosowanej metodyki badań i podkreśliłoby innowacyjność uzyskanych wyników.

Ponadto rozprawa zawiera wiele drobnych błędów redakcyjnych i nieścisłości merytorycznych. Szczegółowe uwagi:

1. Str. 11 i następne: w pracy stosowane są niejednorodne oznaczenia, raz wierzchołki są oznaczane jako x , y , v a w innych miejscach jako v_1 , v_2 , W szczególności odniesienia do elementów zbiorów powinny być indeksowane. Ujednolicenie oznaczeń zwiększyłoby czytelność pracy. Pomocny byłby także wykaz oznaczeń.
2. Definicje 1, 2 i kolejne są zaczerpnięte z literatury, brakuje wskazania źródła.
3. Rysunek 2.4 i wiele kolejnych są nieczytelne.
4. Str. 19: „porycia” => „pokrycia”.
5. Str. 25 i kolejne rozdziały: podsumowanie w takiej formie nie wydaje się potrzebne. Przedstawia jedynie wykaz tego co zostało opisane w danym rozdziale, zatem nie wnosi nic nowego. Wartościowe byłoby podsumowanie zawierające wnioski wynikające z przedstawionych w rozdziale zagadnień i problemów.
6. Str. 27: „wraz” => „wraz z”.
7. Str. 29: „mała liczbę” => „małą liczbę”.
8. Str. 30: w Algorytmie 1 nie jest określone co oznacza że stan S_k jest pokrywany przez S_i , brakuje też definicji pojęcia „stan sieci Petri”, nie jest określone co oznacza $S_i(p)$.
9. Str. 32: Algorytm 2 to nie jest „generowanie komponentów” ale „wyznaczanie komponentów”.
10. Str. 33: „silne spójne” => „silnie spójne”.
11. Str. 33: użycie słowa „Twierdzenie” zamiast „Propozycja” byłoby bardziej sensowne.
12. Str. 36: „W etapie końcowy” => „W etapie końcowym”.
13. Str. 37: „kolorem zielonym” => „kolorem pomarańczowym”.
14. Str. 37-38: sekwencje są oznaczane takimi samymi symbolami jak stany tzn. S_1 , S_2 , S_3 .
15. Str. 38: poprzez dodawanie jednowejściowych i jednowyjściowych miejsc i przejść, sekwencja S_3 może być dalej rozszerzana do S_4 , S_5 itp. Dlaczego takie sekwencje nie są rozpatrywane w pracy?
16. Str. 39: niejednoznaczne oznaczenia stosowane w opisie algorytmu 3 powodują nieczytelność. Zamiast „licznik miejsc(i)” powinno być albo „licznik miejsc” albo „i”. Analogicznie inne oznaczenia.
17. Str. 40: schemat blokowy jest nadmiarowy, przedstawia dokładnie to samo co Algorytm 3.
18. Str. 40: „związku z tym” => „w związku z tym”.
19. Str. 44: w opisie algorytmu są nadmiarowe opisy, najpierw opis słowny operacji a w nawiasie opis symboliczny. To jedynie wprowadza zamieszanie i powoduje nieczytelność algorytmu.
20. Str. 45: „45rof” => „44rof”.
21. Str. 45: pojęcie „należy do stosu” jest niezrozumiałe, relacja „należy do” jest określona w odniesieniu do zbiorów a nie stosów.
22. Str. 47: „ora” => „oraz”.
23. Str. 47: na rys. 4.5 b) brakuje wejść dla przejścia powstałego po redukcji.

- 24. Str. 50: Na rys. 4.8 brak etykiety „T4” dla krawędzi.
- 25. Str. 55: „eksperymentów przeprowadzonego” => „eksperymentów przeprowadzonych”.
- 26. Str. 63, 64: „wstanie” => „w stanie” (wielokrotnie),
- 27. Str. 65: „system cyber-fizycznego” => „systemu cyber-fizycznego”.

Wyżej wymienione uwagi mają na celu jedynie zwrócenie uwagi Autorowi na możliwości poprawienia tekstu i zwiększenia czytelności rozprawy, nie mają charakteru uwag merytorycznych.

7. Znaczenie uzyskanych wyników

Wyniki wykonanych badań w formie zaimplementowanych metod analizy sieci Petriego mają zastosowanie do dalszych prac badawczych a także w innych pracach, w których istotne jest przeprowadzenie weryfikacji sieci Petriego pod kątem żywotności.

Biorąc pod uwagę wykorzystanie sieci Petriego w modelowaniu części sterujących systemów cyber-fizycznych, uzyskane wyniki mogą mieć zastosowanie w weryfikacji poprawności projektowania takich systemów. Ponieważ opracowana metoda charakteryzuje się dużą efektywnością, może być stosowana w odniesieniu do dużych systemów, których modele części sterujących składają się z wielu tysięcy stanów. Chociaż Doktorant rozpatrywał tematykę pracy jedynie w kontekście systemów cyber-fizycznych, to jednak wydaje się, że zastosowanie jest szersze i dotyczy dowolnych systemów, w których żywotność sieci Petriego, jako metody modelowania, jest istotna.

8. Ocena końcowa rozprawy

Podsumowując, uważam że rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Popławskiego przedstawia oryginalne rozwiązanie zaprezentowanego w niej zagadnienia naukowego. Autor podjął w niej problem, który ma istotne znaczenie w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych w zakresie dyscypliny naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Trafnie określił założenia dotyczące jego analizy i uzyskane wyniki potwierdził wykonanymi eksperymentami. Wykazał się dobrą znajomością ogólnej wiedzy teoretycznej i praktycznej z zakresu tematyki pracy, a także umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Stwierdzam, że recenzowana praca spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. poz. 1668, art. 187) i niniejszym wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Stanisław Demin