

dr hab. inż. Lesław Gniewek, prof. PRz
Politechnika Rzeszowska
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Katedra Informatyki i Automatyki
35-959 Rzeszów, al. Powstańców Warszawy 12
tel.: 17 8651613
e-mail: lgniewek@prz.edu.pl

Rzeszów, 4.06.2023 r.

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
MGRA INŻ. MARCINA WOJNAKOWSKIEGO
ZATYTUŁOWANEJ
„ANALYSIS OF BOUNDEDNESS AND SAFENESS IN A PETRI NET-BASED
SPECIFICATION OF CONCURRENT CONTROL SYSTEMS”**

Podstawa formalna wykonania recenzji

Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie uchwały Senatu Uniwersytetu Zielonogórskiego z dnia 29 marca 2023 r.

1. Aktualność i znaczenie tematyki oraz cel rozprawy

Sieci Petriego to teoria modelowania systemów sekwencyjno-współbieżnych rozwijana od ponad 60 lat. Znalazła ona swoje miejsce w wielu zastosowaniach przemysłowych, takich jak zadania planowania produkcji, zarządzanie układami sterowania, programowanie sterowników przemysłowych, synteza oprogramowania systemowego, wykrywanie i diagnostyka uszkodzeń. Stały rozwój zawdzięczają klarownej reprezentacji graficznej modelowanych systemów oraz matematycznym podstawom umożliwiającym analizę ich własności statycznych i dynamicznych. Powstało wiele klas modeli sieciowych, takich jak sieci czasowe, ciągłe, interpretowane, kolorowane, rozmyte, stochastyczne, hierarchiczne oraz wiele ich modyfikacji i hybryd. Najbardziej znanym zastosowaniem sieci Petriego jest wykorzystanie ich teorii w programowaniu sterowników PLC, które sterują większością maszyn i urządzeń stosowanych w przemyśle. W normie PN-EN 61131 zdefiniowano graf sekwencji SFC, który jest realizacją sieci bezpiecznych przeznaczoną dla środowisk programistycznych tych sterowników. Często jest nazywany piątym językiem programowania sterowników PLC obok dwóch języków graficznych LD i FBD oraz dwóch języków tekstowych IL i ST, zdefiniowanych w tej normie. Pozwala on na organizację układu sterowania w formie grafu z wykorzystaniem współbieżności sekwencji. Początkowo możliwość programowania sterowników z wykorzystaniem grafu SFC była zarezerwowana wyłącznie dla dużych sterowników. Obecnie już nawet małe sterowniki mają możliwość obsługi programu w tej formie. Przekształcenie graf SFC do

postaci sieci Petriego i analiza własności sieci pod kątem bezpieczeństwa i ograniczoności jest nadal bardzo ważnym elementem umożliwiającym weryfikację poprawności zaprojektowanego grafu sterowania, szczególnie w systemach krytycznych. Graf SFC, pomimo tego, że ze swojej natury jest ograniczony i bezpieczny, może zostać niepoprawnie zaprojektowany, czego przykład pokazano w normie. Badanie własności ograniczoności i bezpieczeństwa narzędziami do analizy sieci Petriego jest bardzo dobrym sposobem na weryfikację układu sterowania już na etapie projektowania. Wychwycenie błędów na wczesnym etapie znacznie obniża koszty ich późniejszej eliminacji. Dlatego też badania prowadzone nad efektywnymi sposobami weryfikacji projektowanego układu sterującego są aktualną i istotną aktywnością naukową. Rozprawa doktorska przygotowana przez mgr. inż. Marcina Wojnakowskiego doskonale wpisuje się w ten trend badawczy. Ukierunkowana jest na formalną analizę sieci Petriego z wykorzystaniem środowiska Hippo, które od wielu lat rozwijane jest na Uniwersytecie w Zielonej Górze.

Podstawowym celem rozprawy doktorskiej było opracowanie nowych algorytmów pozwalających w sposób bardziej efektywny analizować dwie własności sieci Petriego, jakimi są ograniczoność dynamiczna i bezpieczeństwo. Cel rozprawy przedstawiono w sposób klarowny. Jednym z zadań postawionym sobie przez autora jest praktyczna weryfikacja zaproponowanych metod z wykorzystaniem środowiska Hippo.

Reasumując, podjęta w rozprawie doktorskiej tematyka jest ważna i aktualna z naukowego punktu widzenia i ma duże praktyczne znaczenie. Prowadzi również do wzbogacenia możliwości środowiska Hippo, umożliwiającego modelowanie i analizę systemów sekwencyjno-współbieżnych przedstawionych w formie sieci Petriego, a przez to znacznie zwiększa praktyczną możliwość wykorzystania, zaproponowanych przez Autora, metod analizy własności sieci.

2. Ocena merytoryczna rozprawy

Przedłożona rozprawa doktorska mgr. inż. Marcina Wojnakowskiego składa się z 7 rozdziałów, w tym wstęp i podsumowanie, zawiera stosowną bibliografię oraz 2 dodatki przedstawiające wyniki przeprowadzonych eksperymentów w środowisku Hippo. W bibliografii zamieszczono 176 pozycji, w tym 13 publikacji, których współautorem jest mgr inż. Marcin Wojnakowski (poz. 18, 71, 115, 122, 154, 157, 159, 160, 165-169).

Struktura rozprawy doktorskiej przygotowanej przez mgr. inż. Marcina Wojnakowskiego jest poprawna i ma logiczne uzasadnienie. W rozdziale pierwszym Autor wprowadza czytelnika w tematykę pracy i przedstawia motywację do jej podjęcia. Następnie formułuje tezę swojej pracy, według której analiza ograniczoności i bezpieczeństwa współbieżnych systemów sterowania przedstawionych w formie sieci Petriego może być przeprowadzona efektywnie (ang. effectively) i skutecznie (ang. efficiently). Dzięki temu, że w słowniczku zamieszczonym na początku pracy określono, że metoda jest efektywna jeśli prowadzi do otrzymania poprawnego wyniku, a skuteczna jeżeli wynik zostanie osiągnięty w założonym czasie, teza pracy jest jasna i zrozumiała. Autor stawia sobie cztery cele szczegółowe, aby udowodnić postawioną tezę. Są to:

- dokonanie szerokiego przeglądu dotychczasowych badań na temat ograniczoności i bezpieczeństwa sieci Petriego,
- zaproponowanie nowych algorytmów pozwalających na analizę ograniczoności sieci,
- zaproponowanie nowych algorytmów pozwalających na analizę bezpieczeństwa sieci,
- zweryfikowanie skuteczności i efektywności zaproponowanych metod.

W kolejnych rozdziałach pracy Autor konsekwentnie dąży do osiągnięcia postawionych sobie celów. W rozdziale pierwszym Autor zaproponował również, aby przyjąć 1 godzinę jako założony czas decydujący o skuteczności algorytmu. W pracy brakuje jednak uzasadnienia, dlaczego ten okres Autor uznał za najbardziej optymalny.

W rozdziale drugim Autor przedstawił podstawy teoretyczne budowy i działania sieci Petriego. Przyjął podstawową definicję sieci Petriego, według której sieć jest czwórką składającą się ze skończonego zbioru miejsc, skończonego zbioru tranzycji, skończonego zbioru łuków i wektora opisującego rozkład znaczników w chwili początkowej. Dla tej klasy sieci Autor prowadził swoje badania. Przedstawił między innymi różne definicje własności sieci oraz podstawy jej opisu algebraicznego. Nie zachował jednak staranności, prezentując niektóre podstawowe definicje, które są dobrze opisane w literaturze i nie ustrzegł się błędów edycyjnych, które powodują, że definicje te są niepoprawne. Szczegóły zamieściłem w kolejnym rozdziale niniejszej recenzji.

Rozdział trzeci zawiera przegląd literatury na temat wyznaczania grafu osiągalności i P-niezmienników sieci, które autor wykorzystuje w dalszej części pracy oraz na temat dwóch własności sieci jakimi są osiągalność i bezpieczeństwo. Na początku Autor zajmuje się grafem osiągalności. Dokonuje przeglądu prac na temat budowy tego grafu, a następnie prezentuje algorytm budowy grafu zaproponowany w przełomowej pracy Tadao Muraty z 1989 r. Niestety, Autor nie dołożył staranności, aby skrupulatnie zaprezentować dobrze znany algorytm, a przedstawił tylko jego fragment, który wykorzystał w dalszej części pracy. W algorytmie grafu brakuje m.in. tworzenia krawędzi/łuków grafu, które są jego integralną częścią. Ponadto, przedstawiony algorytm generuje graf pokrycia sieci Petriego, który w szczególnym przypadku, gdy nie zawiera symbolu ω , nazywany jest grafem osiągalności. W przedstawionym przypadku symbol ω występuje, więc pomyłona została nazwa grafu. Następnie Autor dokonuje przeglądu literatury na temat wyznaczania P-niezmienników oraz przedstawia dwa algorytmy ich wyznaczania. Pierwszy z nich jest bardzo ogólny i wynika wprost z definicji P-niezmiennika, a drugi to algorytm, zaproponowany przez J. Martinez i M. Silvē, który jest powszechnie używany. W kolejnych dwóch podrozdziałach Autor przedstawia przegląd literatury na temat analizowania sieci Petriego pod względem ograniczoności i bezpieczeństwa. Dla każdej z tych dwóch własności przedstawione zostały po dwa algorytmy pozwalające na ich analizę. Jeden oparty jest na analizie grafie, a drugi na badaniu pokrycia sieci P-niezmiennikami. W ten sposób Autor zaprezentował podbudowę teoretyczną pod główną część swojej pracy, którą prezentuje w kolejnych dwóch rozdziałach.

W rozdziale czwartym Autor proponuje nowe podejście do badania własności sieci. W pierwszym podrozdziale przedstawia trzy metody (algorytmy) badania ograniczoności sieci. Autor wprowadza tu modyfikację polegającą na tym, że podczas budowy grafu sieci badane jest wystąpienie warunku, który pozwala na wstawienie symbolu ω . Jego wystąpienie powoduje przerwanie działania algorytmu i wystawieniu informacji, że sieć nie jest siecią ograniczoną. Może to znacznie skrócić analizę ograniczoności sieci, gdyż w wielu przypadkach nie będzie wymagane generowanie całego grafu. Autor podobnie jak w rozdziale 3 przedstawił tylko fragment algorytmu (bez generowania krawędzi grafu), rozbudowując go zgodnie ze swoim pomysłem. Podpis pod algorytmem sugeruje, że jest to kompletny algorytm i do tego oparty na grafie osiągalności, a nie grafie pokrycia jak jest w rzeczywistości. Jednak sama idea zaproponowana przez Autora jest godna uwagi. Druga metoda polega na przerwaniu działania klasycznego algorytmu badania pokrycia sieci P-niezmiennikami w chwili, gdy wszystkie miejsca sieci są pokryte przez znalezione do tego czasu P-niezmienniki. Podobnie, jak w poprzedniej metodzie badania sieci może to znacznie skrócić analizę ograniczoności, gdyż nie zawsze będzie konieczne wyznaczanie pełnego zbioru minimalnych P-niezmienników. Trzecia zaproponowana metoda badania ograniczoności sieci wykorzystuje algebrę liniową, a jej najważniejszym elementem jest eliminacja Gaussa-Jordana. Od sposobu jej implementacji zależy czas działania algorytmu. Metoda ta będzie wykorzystywana jako element wspomagający, ponieważ wskazuje tylko, czy sieć Petriego nie jest pokryta P-niezmiennikami. Nie dowodzi to jednak nieograniczoności (co pokazano na przykładzie), ale w takim przypadku jest ona bardzo prawdopodobna.

W drugim podrozdziale Autor przedstawił dwie metody (algorytmy) badania własności bezpieczeństwa sieci. Są one analogiczne, jak w przypadku badania ograniczoności sieci. Pierwsza opiera się na budowie grafu pokrycia, a druga na badaniu pokrycia sieci P-niezmiennikami. Obydwa algorytmy mogą zostać przerwane w następstwie wystąpienia odpowiedniego warunku (jak poprzednio), co powoduje wcześniejsze wygenerowanie odpowiedzi.

Metody badania ograniczoności i bezpieczeństwa sieci Petriego, zaproponowane w rozdziale czwartym, a szczególnie metoda wykorzystująca algebrę liniową, są bardzo wartościowymi elementami pracy. Wraz z metodologią ich wykorzystania, przedstawioną w kolejnym rozdziale, wnoszą znaczący wkład w rozwój metod badania własności sieci.

W rozdziale piątym Autor przedstawia i analizuje wyniki swoich badań mających na celu weryfikację opracowanych metod badania sieci. Testuje swoje metody w środowisku Hippo, w którym je zaimplementował. Niestety w pracy nie zamieszczono ani jednego fragmentu kodu, który pokazywałby w jaki sposób zrealizowano algorytmy. Pokazano natomiast bardzo dużą liczbę wyników przeprowadzonych eksperymentów, które zamieszczono w załączniku.

Na początku tego rozdziału Autor analizuje wyniki badania ograniczoności sieci otrzymane przy wykorzystaniu metody opartej na grafie pokrycia, porównując wyniki uzyskane klasyczną metodą oraz zaproponowaną przez siebie modyfikacją. Dochodzi do wniosku, że dla sieci potencjalnie nieograniczonej zaproponowana metoda daje wynik

w najkrótszym czasie. W przypadku dużych sieci ograniczonych metoda ta może nie prowadzić do otrzymania wyniku ze względu na dużą złożoność obliczeniową. Druga analizowana metoda oparta na pokryciu sieci P-niezmiennikami jest z kolei bardziej efektywna dla sieci potencjalnie ograniczonych, a w przypadku sieci potencjalnie nieograniczonych może nie prowadzić do uzyskania wyników ze względu na potrzebę wyznaczenia wszystkich minimalnych P-niezmienników. Dlatego też ważny jest wybór właściwej metody dla badania konkretnej sieci. Autor proponuje więc zastosowanie trzeciej metody do wstępnej analizy ograniczoności sieci. Według przeprowadzonych testów jest to metoda najszybsza, ale wskazuje tylko, czy sieć Petriego nie jest pokryta P-niezmiennikami, a więc czy jest prawdopodobnie nieograniczona. Chociaż nie daje ostatecznych wyników jest doskonałą wskazówką jaką wybrać metodę, aby uzyskać wynik w rozsądnym czasie. Autor wskazuje więc w jakiej kolejności używać zaproponowane przez siebie metody w zależności od otrzymanych wyników wstępnej analizy przy użyciu metody trzeciej. Następnie Autor szczegółowo analizuje otrzymane wyniki badania bezpieczeństwa sieci wykorzystując dwie zaproponowane przez siebie metody. Tutaj również dochodzi do wniosku, że trzecia zaproponowana metoda analizy ograniczoności może być pomocna do oszacowania w czasie wielomianowym, którą z proponowanych dwóch metod wybrać, aby otrzymać wynik badania własności bezpieczeństwa sieci w rozsądnym czasie.

Analizy zamieszczone w rozdziale piątym i wyciągnięte wnioski potwierdzają, że Autor posiada umiejętności prowadzenia badań naukowych, analizowania otrzymanych wyników i szukania optymalnych rozwiązań w sytuacjach, gdy nie zawsze można otrzymać wynik lub gdy czas oczekiwania na wynik jest nieakceptowalnie długi.

W rozdziale szóstym Autor analizuje konkretny przypadek sieci Petriego, który opisuje system zarządzania produkcją. Dokonuje badania własności tej sieci wykorzystując zaproponowane w rozdziale czwartym metody analizy. Wykorzystuje je według kolejności wynikającej z wniosków sformułowanych w rozdziale piątym. W ten sposób pokazuje praktyczny sposób wykorzystania zaproponowanych metod dla tego przypadku. Szkoda, że Autor nie wybrał do badania diagram sieci, który pełniłby rolę układu sterowania. Przykład taki lepiej pasowałby do tytułu tego rozdziału.

W ostatnim rozdziale Autor dokonał krótkiego podsumowania wyników swoich badań, które doprowadziły do potwierdzenia postawionej tezy. Wymienił najważniejsze swoje osiągnięcia i zaproponował kolejne tematy badań, które mogą przyczynić się do dalszego usprawniania procesu wyznaczania własności sieci Petriego.

3. Uwagi krytyczne i spostrzeżenia

Rozdział 1

- 1) Definiując tezę i cele pracy (str. 3) autor arbitralnie założył, że algorytm można uznać za efektywny, jeżeli wynik jego działania można otrzymać w czasie 1 godziny. Autor nie uzasadnił jednak, dlaczego przyjęcie 60 minut uznał za najbardziej optymalne.

Rozdział 2

- 2) W definicji 2.20 autor napisał, że tranzycja t jest zezwolona w znakowaniu M , jeśli każde miejsce wejściowe p tranzycji t należy do M . Wektor M jest wektorem złożonym z liczb, jak więc p może należeć do M ? Zwykle warunkiem zezwolenia tranzycji jest, aby liczba znaczników we wszystkich miejscach wejściowych tranzycji była co najmniej równa 1 (gdy nie rozważamy wag przypisanych do łuków, jak jest w tej pracy).
- 3) W definicji 2.21 autor zdefiniował graf osiągalności sieci jako parę złożoną ze zbioru znakowań osiągalnych, które tworzą węzły grafu i ze zbioru odpalonych tranzycji. Czy można zdefiniować graf skierowany, który nie posiada łuków/krawędzi łączących węzły?
- 4) W definicji 2.38 zawarto warunek: $|p^\circ| \leq 1 \cup {}^\circ p(p^\circ) = p$. Co oznacza zapis ${}^\circ p(p^\circ) = p$? Dla mnie ten zapis jest całkowicie niezrozumiały.
- 5) W definicji 2.39 napisano warunek $p1^\circ \cap p2^\circ \neq \emptyset \Rightarrow |p1^\circ| = |p2^\circ| = 1$. Dlaczego liczbę tranzycji wyjściowych ograniczono do 1?
- 6) W definicji 2.40 napisano warunek $|p1^\circ| \supseteq |p2^\circ| \vee p1^\circ \subseteq p2$, w którym raz porównujemy liczbę zbiorów, a raz same zbiory. Dlaczego?

Rozdział 3

- 7) Na str. 23 w drugim akapicie Autor napisał: *“If the Petri net was unbounded, the elevator could behave in an indefinite way and enter states not foreseen by the designer.”* Zdanie to sugeruje, że sieć nieograniczona nie może poprawnie sterować windą. Można jednak wyobrazić sobie sieć, która ma miejsce nieograniczone pełniące rolę licznika przejazdów windy i poprawnie steruje windą. Poprawność algorytmu sterowania zależy w rzeczywistości od poprawności zaprojektowanej sieci.
- 8) Na str. 23, również w drugim akapicie, Autor napisał: *„Moreover, a safe Petri net may be used to model systems aimed at hardware implementation in microcontrollers or FPGAs—logical control (token/ no token).”* Czy sieć, która nie jest siecią bezpieczną, nie można zrealizować w układach FPGA? Przykładowo, przy realizacji 8 bitowej można przecież przyjąć, że liczba bitowa 000 000 oznacza 0 znaczników w miejscu, 0000 0001 – 1 znacznik, 0000 0010 – 2 znaczniki, 0000 0011 – 3 znaczniki itd.
- 9) Na str. 26 Autor przedstawił algorytm budowy grafu osiągalności (algorytm 3.1), który oparty jest na fundamentalnej pracy Tadao Muraty z 1989 roku, o czym wspomina sam Autor.
 - a) W artykule [112] Murata zaproponował algorytm budowy grafu pokrycia sieci Petriego, w którym występują węzły pokrywające zawierające symbol ω i umożliwiające budowę tego grafu dla sieci nieograniczonych. W szczególnym przypadku, dla sieci ograniczonej, symbol ω nie występuje i mamy wówczas do czynienia z grafem osiągalności. W algorytmie 3.1 przedstawionym przez Autora występuje symbol ω , więc nie jest to algorytm budowy grafu osiągalności, ale grafu pokrycia.

- b) W algorytmie 3.1 nie ma konstrukcji łuków łączących węzły grafu. W algorytmie Muraty wprost napisano o rysowaniu łuku etykietowanego odpowiednią tranzycją. Nie ma również uporządkowanych par wierzchołków, które mogłyby tworzyć ścieżkę, o której napisano w algorytmie.
- c) W algorytmie 3.1 nie ma przypisania wektora M_s do wektora M (tak, jak jest w 15 linii algorytmu 4.1).

10) Na str. 31 w tabeli 3.1 źle określono zakresy znakowań dla miejsc p4 i p5.

Rozdział 4

- 11) Na stronie 39 zaproponowano algorytm 4.1 przeprowadzający analizę ograniczoności sieci na podstawie grafu osiągalności. Działanie tego algorytmu opiera się na algorytmie 3.1, który może zostać w odpowiednim momencie zatrzymany, dlatego też do niego odnoszą się wcześniej sformułowane uwagi 9a i 9b.
- 12) Na stronie 49 zaproponowano algorytm 4.4 przeprowadzający analizę bezpieczeństwa sieci na podstawie grafu osiągalności. Działanie tego algorytmu opiera się również na algorytmie 3.1, który może zostać w odpowiednim momencie zatrzymany, dlatego też do niego odnoszą się wcześniej sformułowane uwagi 9a i 9b oraz 9c.

Rozdział 5

- 13) Rozdział 5 opisuje weryfikację zaproponowanych algorytmów w środowisku Hippo. Czy Autor próbował dokonać analizy badanych własności sieci z wykorzystaniem innych środowisk, tj. PIPE czy CPN-Tools?
- 14) W pracy nie zamieszczono nawet jednego fragmentu kodu, który obrazuje, w jaki sposób zrealizowano algorytmy.
- 15) Na stronie 63, w czwartym wierszu od końca, Autor napisał: „...*it is probably unbounded, hence also safe.*”

Rozdział 6

- 16) Uwagi do rozważanej przykładowej sieci Petriego:
 - a) Pełni rolę sieci zarządzającej, a nie sterującej.
 - b) Miejsca p10 i p11 w tym samym momencie uzyskują znacznik i w tym samym momencie tracą go. Nie są to więc procesy równoległe, a jedynie jednoczesne, dlatego też można zredukować te dwa miejsca do jednego. Podobnie jest dla par miejsc: p14 i p15, p19 i p20 oraz p21 i p22. Zaproponowana sieć jest więc w znacznej części sekwencyjna.
 - c) Nie podano sygnałów wejściowych dla wielu tranzycji. Jeśli ich nie będzie, to przejście znacznika z miejsca p9 do p18 nastąpi po 5 taktach zegara synchronizującego pracę sieci, bez względu na stan rzeczywisty procesu produkcji.
 - d) Nie określono roli miejsc p4 i p6.

4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska pt. „*Analysis of boundedness and safeness in a Petri net-based specification of concurrent control systems*” stanowi interesującą całość, logicznie prowadzącą do osiągnięcia zamierzonych celów badawczych czytelnie zdefiniowanych na początku pracy. Autor nie ustrzegł się błędów, w rozdziałach drugim i trzecim, podczas opisu teoretycznych podstaw wprowadzających do tematyki dysertacji, jednak nie miało to wpływu na osiągnięty rezultat, który potwierdza założoną na początku tezę pracy. Za najważniejsze wyniki rozprawy można uznać zaproponowanie nowych algorytmów służących do badania dwóch własności sieci Petriego – ograniczoności i bezpieczeństwa oraz zaproponowanie metodologii wykorzystania tych algorytmów jako efekt szczegółowej analizy otrzymanych wyników. Ważnymi elementami pracy, które podnoszą jej wartość, są: praktyczna implementacja zaproponowanych metod poprzez integrację ich ze środowiskiem Hippo oraz szczegółowa analiza bardzo dużej ilości diagramów sieci.

Rozprawa doktorska przygotowana przez mgr. inż. Marcina Wojnakowskiego potwierdza jego szeroką wiedzę i umiejętności praktyczne w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Zaproponowane metody (algorytmy) wyznaczenia dwóch własności sieci Petriego oraz metodologia ich wykorzystania, powstała na bazie szczegółowej analizy uzyskanych wyników, stanowią oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i potwierdzają predyspozycje Autora do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W związku z tym stwierdzam, że przedłożona rozprawa spełnia wymagania stosownej Ustawy i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.