

dr hab. inż. Adam Milik, prof. PŚ.  
Politechnika Śląska  
Wydział Automatyki Elektroniki i Informatyki  
Katedra Systemów Cyfrowych  
ul. Akademicka 16  
44-100 Gliwice

Gliwice, 1.07.2023

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Stefanowicza  
dla Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja  
Uniwersytetu Zielonogórskiego w Zielonej Górze**  
(podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny  
Informatyki Technicznej i Telekomunikacji z dnia 2.05.2023)

**Tytuł rozprawy: Dekompozycja współbieżnych systemów sterowania  
opisanych sieciami Petriego**

**Autor rozprawy:** mgr inż. Łukasz Stefanowicz

**Promotor rozprawy:** dr hab. inż. Andrzej Kratkiewicz, prof. AGH

**Promotor pomocniczy:** dr hab. inż. Remigiusz Wiśniewski, prof. UZ

**Dziedzina:** nauki techniczne

**Dyscyplina:** Informatyka Techniczna i Telekomunikacja

## **1. Zagadnienia naukowe rozprawy – cel i teza pracy**

Tematem rozprawy jest dekompozycja współbieżnych systemów sterowania opisanych sieciami Petriego. Autor w rozdziale 1 stawia następującą tezę: *Dekompozycja współbieżnych systemów sterowania opisanych sieciami Petriego może zostać w sprawny i skuteczny sposób zrealizowana z zastosowaniem metod algebry liniowej oraz teorii hipergrafów.* Następnie zostają sformułowane dwie tezy pomocnicze pozwalające na doprecyzowanie obszaru badawczego, w których autor wyróżnia:

1. Podział sieci Petriego na podsieci typu automatowego z wykorzystaniem algebry liniowej.
2. Selekcja uzyskanych podsieci automatowych może zostać zrealizowana z zastosowaniem hipergrafu i transwersal dokładnych

W celu wykazania postawionej tezy autor najpierw wprowadza czytelnika w zagadnienia teoretyczne niezbędne do przedstawienia dalszych rozważań oraz opracowanych algorytmów.

Następnie opisany zostaje stan wiedzy w zakresie prac skupiając się na zagadnieniach i algorytmach będących obszarem bezpośrednim działań naukowych autora. Wymagało to dokładnego przeanalizowania oraz implementacji wybranych algorytmów. W dalszej części autor przedstawia swój oryginalny wkład w postaci opracowanych metod dekompozycji. Wykorzystanie hipergrafów oraz implementacja ciekawych obserwacji autora pozwoliła na uzyskanie algorytmów dekompozycji sieci Petri na składowe automaty sekwencyjne oraz wyboru zśród nich niezbędnej liczby gwarantującej pełne pokrycie sieci wejściowej. Istotnym elementem jest wprowadzenie hipergrafów oraz metod operowania na nich (np. szybki algorytm redukcji) pozwalające na istotne skrócenie czasu wykonania obliczeń. Ze względu na pewne ograniczenia wynikające ze stosowalności opracowanych algorytmów autor zaproponował algorytm, który dla pewnej klasy sieci Petri (stanowiącej niewielką część licznego zbioru testowego) stosuje metody klasyczne. Pozwoliło to uzyskać algorytmy o charakterze masowym, charakteryzujące się krótszym czasem realizacji obliczeń dla większości rozważanych testów.

Uwzględniając powyższe stwierdzam, że praca doktorska mgr. inż. Łukasza Stefanowicza wpisuje się w aktualny nurt związany z projektowaniem i analizą układów sterowania ze szczególnym uwzględnieniem realizacji współbieżnej lub wielozadaniowej. Przedstawione zagadnienia dekompozycji sieci Petri mogą znaleźć zastosowania w dobrze ugruntowanych językach programowania układów sterowania przemysłowego a szczególnie w języku SFC. Podsumowując, praca odpowiada na współczesne problemy związane z automatycznym projektowaniem układów sterowania. Należy podkreślić, że opracowane algorytmy pozwoliły istotnie skrócić czas dekompozycji sieci na składowe automaty sekwencyjne, co jest niezwykle cenne w przypadku złożonych projektów. Należy również zauważyć wkład w autora rozwój ogólnodostępnej bazy testowej HIPPO oraz algorytmów analizy sieci Petri w niej udostępnionych.

## **2. Zawartość i ocena merytoryczna**

Recenzowana rozprawa doktorska przedstawia w sposób systematyczny opracowane przez autora algorytmy dekompozycji współbieżnych systemów sterowania opisanych sieciami Petriego. Składa się z sześciu rozdziałów oraz pięciu dodatków, które w sposób uporządkowany prowadzą czytelnika poprzez zagadnienia teoretyczne kreślące tło oraz osadzenie prowadzonych badań, następnie pokazując oryginalny wkład autora oraz jego krytyczną ocenę za pomocą licznego zbioru testów. Ostatecznie uzyskane efekty zostają podsumowane. Dodatki przedstawiają wkład autora w rozwój ogólnodostępnej bazy testów i algorytmów HIPPO operujących na sieciach Petri, dowody matematyczne postawionych twierdzeń oraz szczegółowe wyniki przeprowadzonych eksperymentów.

W rozdziale pierwszym autor wprowadza czytelnika w tematykę pracy, ilustrując poruszone zagadnienia przeglądem literatury odnoszącym się do rozważanego problemu. Umiejscawia przedmiot swoich zainteresowań w obrębie zagadnień odwzorowania systemów

sterowania opisanych metodą przedstawiającą ich równoległe działanie (sieci Petri). W konsekwencji autor skupia się na opisie integrującym we wspólnym sposobie przedstawienia wielokontekstowe układy sterowania. Określa to obszar zainteresowań mający na celu dekompozycję układu sterowania na automaty sekwencyjne. W procesie dekompozycji autor wykorzystuje oryginalne podejście z zastosowaniem hipergrafów. Następnie zostaje sformułowana teza pracy, która dla lepszego zilustrowania prowadzonych rozważań zostaje podzielona na dwie tezy pomocnicze. W celu wykazania postawionej tezy wyznaczone zostają trzy zadania polegające na opracowaniu algorytmów dekompozycji sieci Petriego, selekcji podsieci automatowych oraz opracowaniu odpowiednich funkcji bibliotecznych dla komputerowego systemu wspomagania projektowania.

Rozdział drugi wprowadza czytelnika w podstawowe pojęcia teoretyczne wykorzystywane w dalszej części pracy. Znajduje się tutaj definicja sieci Petri oraz jej kluczowe własności z punktu widzenia układów sterowania. Trzema istotnymi pojęciami w tym zakresie są: żywotność, osiągalność oraz bezpieczeństwo. Wprowadzone pojęcia pozwalają na sprecyzowanie wymagań stawianych sieci, która będzie podlegała dekompozycji. Autor przedstawia również pojęcia związane z hipergrafami będące istotną częścią zaproponowanych algorytmów dekompozycji. Na potrzeby oceny efektywności obliczeniowej oraz złożoności obliczeniowej zostają przytoczone niezbędne definicje i pojęcia z tego zakresu.

W kolejnym rozdziale zostają opisane obecnie istniejące algorytmy stanowiące punkt startowy dla autora do rozwoju własnych implementacji. Podstawę dekompozycji sieci Petri na automaty sekwencyjne jest algorytm Martineza-Silvy do wyznaczania niezmienników miejsc sieci Petri. Kolejnym elementem jest metoda określenia przynależności hipergrafu do klasy  $xt$  z wykorzystaniem algorytmu XTREC. W celu lepszego zilustrowania algorytmów zostają zamieszczone przykłady, które przedstawiają szczegółowo sposób działania poszczególnych algorytmów dla danych wejściowych spełniających różne kryteria. W pracy autor opisuje algorytm szybkiej redukcji ułatwiającej znalezienie pokrycia. W metodzie wykorzystano koncepcje znane z syntezy logicznej polegające na wyborze minimalnego zbioru pokrycia. Można tutaj odnaleźć wiele podobieństw do metody Patricka oraz jej implementacji szybkiego wyznaczania pokrycia minimalnego (np. wiersze dominujące i kolumny zdominowane).

Rozdział czwarty przedstawia opracowane przez autora algorytmy dekompozycji i minimalnego pokrycia. W zakresie metod dekompozycji autor przedstawił dwa warianty metod dekompozycji. Etapem początkowym obu metod jest uzyskanie niezmienników sieci za pomocą metody Martineza-Silvy. Następnie zostają wyznaczone podsieci automatowe a na ich podstawie zostaje utworzony hipergraf miejsc. Uzyskany wynik jest analizowany pod kątem przynależności do klasy  $xt$ . Jeżeli spełnia ten wymóg wybór podsieci automatowych prowadzony jest za pomocą algorytmu X, w przeciwnym przypadku metoda 1 wykorzystuje iteracyjny algorytm z nawrotami. W wyniku obserwacji przeprowadzonych przez autora

algorytm X może zostać wykorzystany również w przypadku gdy uzyskany wynik nie musi być dokładny (minimalny). Prowadzi to do powstania algorytmu szybkiego nazwanego w pracy metodą 2. Działanie algorytmu zostało zilustrowane przykładami. W tym miejscu warto odwołać się do przykładu próbującego poddać dekompozycji sieć  $P_{xt1}$  (str. 55 – 57). W obrębie sieci można wyróżnić trzy procesy niezależne przy czym dwa z nich przechodzące przez miejsca P3, P5 oraz P4, P6 odpowiednio pozostają we wzajemnej synchronizacji. Z punktu widzenia algorytmicznego miejsce P3 oraz P4 jak i miejsca P5 i P6 są sobie funkcjonalnie równoważne w konsekwencji mogą zostać scalone do np. P34 i P56. Doktorant nie komentuje zaistniałego problemu. Występowanie i minimalizacja miejsc, które są sobie równoważne powinna być jednym z przedmiotów zainteresowania w tworzonym procesie analizy i syntezy. Rozdział kończy ciekawy przykład układu sterowania z zakresu automatyki domowej. W tym przypadku czytelnik również staje przed problemem efektywności implementacyjnej. Doktorant po przedstawieniu wyniku dekompozycji nie dokonuje dalszej analizy implementacyjnej. Ciekawym dla czytelnika elementem było by zestawienie implementacji programowej i/lub sprzętowej przy wykorzystaniu różnych metod wraz z proponowaną przez autora. Porównanie wyników można przykładowo zestawić z wymaganych zasobów logicznych, maksymalnej częstotliwości pracy układu logicznego, czasu wykonania programu itp.

W celu oceny opracowanych algorytmów poddano je testom. Do tego celu wykorzystano opracowaną bazę HIPPO. Baza stanowi zbiór sieci Petri i została opracowana na wzór testów syntezy logicznej LgSynth89. Sieci sklasyfikowano pod kątem żywotności i bezpieczeństwa, co umożliwia określenie ich przydatności do dekompozycji do sieci automatów sekwencyjnych. W tabelach 5.1 i 5.2 przedstawiono czasy wykonania obliczeń w procesie dekompozycji. W przeważającej większości przypadków czas obliczeń jest znacząco krótszy od metody klasycznej. W zestawieniu odczuwa się brak wskazania sposobu dekompozycji wybranej przez zaproponowane algorytmy. Można przyjąć, że w przypadku gdy czas obliczeń jest długi (porównywalny z metodą klasyczną) zaproponowana metoda wykorzystująca hipergraf nie mogła zostać użyta ze względu na niespełnienie wymogów dekompozycji przez analizowaną sieć. Uwagę zwracają uzyskane wyniki w szczególności dla metody 2 (szybka metoda akceptująca rozwiązanie przybliżone). Czas wykonania algorytmu wynoszący  $1\mu s - 10\mu s$  jest niezwykle krótki, biorąc pod uwagę złożoność operacji, które należy wykonać. Powstają tutaj wątpliwości co do sposobu pomiaru czasu lub uzyskanych wyników. Współczynnik skrócenia czasu obliczeń w wybranych przypadkach zawiera się w granicach od około  $6,34 \cdot 10^6$  do około 2533 (tab. 5.1). Autor w komentarzu wyników nie poddaje analizie tak istotnych a zarazem skrajnych różnic. Powinno to budzić jego zainteresowanie poznawcze jak i ocenę krytyczną zaproponowanego rozwiązania.

Podsumowanie efektów prac autor dokonuje w rozdziale 6. **Na podstawie lektury pracy można stwierdzić, że postawiona w rozdziale 1 teza została udowodniona a cele osiągnięte**

**przez autora.** W szczególności Autor opracował algorytmy podziału wykorzystujące elementy algebry liniowej oraz hipergrafy. Ponadto wykazał na licznych zbiorze testowym istotne skrócenie czasu wykonania podziału sieci z wykorzystaniem zaproponowanych metod, które wynosiło średnio 50% dla metod dokładnych i aż 90% dla metody obciążonej możliwością uzyskania wyniku przybliżonego.

Wykaz literatur zawierający 112 pozycji należy uznać za wyczerpujący. W zestawieniu znajdujemy szeroki przekrój publikacji dobrze ilustrujący zagadnienia poruszane w pracy. Pewnym mankamentem jest cytowanie źródeł do roku 2018. Przykładowo, zainteresowanie sieciami Petri oraz ich odwzorowaniem technologicznym można znaleźć w pracach poświęconych odwzorowaniu układów sterowania wykorzystujących język SFC.

### 3. Uwagi krytyczne, wątpliwości, pytania

Podczas obrony publicznej chciałbym poznać zdanie doktoranta na poniższe zagadnienia:

1. W pracy odczuwa się pewien brak odniesienia do implementacji układowej (sprzętowej i/lub programowej). Czy i w jakim zakresie autor dokonał oceny kosztów implementacji podsieci automatowych w stosunku do innych rozwiązań? Istotą jest poszukiwanie dekompozycji dogodnej dla wybranego sposobu implementacji, tak aby wykazać zyski wynikające z przeprowadzonego podziału układu sterowania. Przedmiotem analizy może być ciekawy przykład zamieszczony w pracy na str. 57 – 62.
2. Rysunek 4.8 zawiera dwa identyczne układy automatowe spośród trzech, na które sieć została podzielona. Ze względu że, nie zostały one oznaczone, odwołam się do ich rozmieszczenia na rysunku. Są to automat wyróżniony w środku oraz po stronie prawej. W opisie autor nie odnosi się dlaczego konieczne są dwie podsieci automatowe o identycznym grafie działania. Jaka jest przyczyna powstania tych identycznych sieci. Uprzedzając nieco odpowiedź, chciałbym zaznaczyć że, przekazanie opisu do narzędzia syntezy logicznej, celem odwzorowania sprzętowego, spowoduje scalenie opisanych dwóch sieci automatowych.
3. Sieci Petri stanowią pewien wycinek opisu układów sterowania. Wydaje się, że bardziej celowym i ogólnym podejściem jest wybór metody opisu SFC opisanego w normie IEC61131-3 obejmującej języki programowania sterowników logicznych. W ogólnym przypadku miejsca sieci Petri lub też akcje skojarzone z krokami diagramu SFC mogą przedstawiać złożone funkcje sterowania lub też mogą być elementami o charakterze hierarchicznym. Jak w tym przypadku doktorant widzi możliwości dekompozycji oraz automatycznej realizacji układów? Jak przedstawić w sposób uniwersalny zdekomponowany system automatów umożliwiający włączenie złożonych obliczeń wymagających więcej niż jednego taktu przebiegu zegarowego do wyznaczenia wyniku?

4. Przedstawione w bazie HIPPO sieci nie opisują warunków logicznych tranzycji. Czy w ocenie autora umieszczenie takich warunków nie wpłynęłoby korzystnie na rozszerzenie analizy funkcjonalnej oraz wykrywanie potencjalnych błędów opisu? Pozwalałoby to również na wykorzystanie elementów syntezy logicznej w procesie analizy sieci.

#### 4. Uwagi szczegółowe

Przedstawiona rozprawa ma również swoje słabe strony i pewne niedociągnięcia. Chciałbym podkreślić, że znaczna część uwag ma charakter polemiczny.

Zaproponowany opis algorytmu XTREC (str. 29, 30) zawiera w sobie definicje hipergrafu nazwanego gwiazdą jak i sposób postępowania. Wydaje się celowym wprowadzenie definicji przed opisem algorytmu np. „Na potrzeby algorytmu zdefiniowano pojęcie gwiazdy...”. Dalej w opisie algorytmu znajdujemy sposób wyznaczenia części wspólnej. Użyte symbole  $F, R, X, st(v_n)$  nie zostały zdefiniowane. Symbol  $F$  jest używany do oznaczenia zbioru krawędzi grafu skierowanego, przy czym w tym przypadku autor operuje hipergrafem, a zatem oczekuje powstania zbioru hiperkrawędzi, co zostało oznaczone wcześniej jako  $E$ . Nie sposób dopasować w tym przypadku użytej symboliki w kontekście jej wystąpienia. Można również wskazać na niefortunny zapis części wspólnej gdzie zamiast iloczynu zbioru znajdujemy iloczyn algebraiczny. Następnie autor podaje skrócone wyjaśnienie pochodzenia symboli  $R$  jako:  $R = X - H$  oraz  $X: X = H - st(v_n)$ . Autor oznaczył przez  $H$  hipergraf. Czytelnik napotyka w tym przypadku trudność z wyznaczeniem różnicy pomiędzy hipergrafami (zakładając że  $X$  musi być argumentem identycznego typu). Wydaje się, że autor nadmiernie skrócił opis algorytmu XTREC, co utrudnia jego analizę i zrozumienie.

Na stronie 68 zamieszczono tabelę 5.1 z czasem wykonania dekompozycji wybranych sieci Petri. W kolumnie 3 znajdujemy wyniki z czasem 0.01ms czyli czas wykonania wynosi zaledwie 10 $\mu$ s. Autor nie odniósł się w komentarzu do uzyskanych wyników. Ze względu na złożoność algorytmu typu drugiego oraz niezbędne operacje systemowe jak alokacja dynamiczna pamięci dla struktur hipergrafu czas obliczeń jest niezwykle krótki, wręcz zastanawiający. Podobnie w przypadku tabeli 5.2, w której zapisano czas wykonania algorytmu wynoszący 1 $\mu$ s. Autor nie komentuje uzyskane wyniku (a szczególnie skali czasu). Warto zwrócić uwagę na relację czasu wynoszącą 7,2 $\cdot$ 10<sup>6</sup> pomiędzy testem crossroad SM a pozostałymi. Wydaje się, że tak zaskakująca różnica czasu powinna zostać zbadana i omówiona przez autora bliżej. Można zatem postawić pytanie. Czy pozostałe użyte przykłady nie posiadały cech szczególnych w stosunku do testu crossroad SM?

Na stronach 72-73 autor ocenia wydajność obliczeniową metod. Sposób opisu jest dość zaskakujący dla czytelnika. Autor stwierdza że metoda 1 jest 50% szybsza od klasycznej a w kolejnym zdaniu zaprzeczając stwierdza, że występują przypadki, które wymagają

dłuższego czasu od metody klasycznej. Jak można się domyślać autor chciał wskazać, że na podstawie przeanalizowanego zbioru testów, średnio czas wykonania obliczeń metodą 1 jest o 50% krótszy w stosunku do metody klasycznej. Podobnie w przypadku metody drugiej. Czytelnik oczekiwałby wyjaśnienia przypadków, w których stosunek czasu wykonania obliczeń istotnie różni się na korzyść zaproponowanych metod.

#### 4.1. Niekompletne definicje lub opisy

- str. 21 Wzór 2.5 brak uzupełnienia definicji krawędzi jako pary wierzchołów np. jako zbiór dwuelementowy:  $E_i = \{v_j, v_k\}$
- str. 22 Wzór 2.6 brak w objaśnieniu krawędzi skierowanej brak definicji uporządkowanej pary wierzchołów np. jako uporządkowanego zbioru lub pary:  $F_i = \{v_s, v_d\}$ , oraz kierunku krawędzi.
- str. 37 Innymi słowy jeżeli dla danego wierzchołka istnieje wiersz (gdzie?) – niedopowiedzenie – wiersz w macierzy incydencji.
- str 67<sup>1</sup>: dekompozycja z użyciem grafów oraz kolorowaniem {czego?} metodą LF – brak precyzji

#### 4.2. Nieakceptowalne sformułowania

- str. 324: czy dany hipergraf jest xt – powinno być w pełnym brzmieniu: czy dany hipergraf jest klasy xt
- str. 575: wyznaczana jest metodą z nawrotami, która z definicji jest wykładnicza – jak można się domyślać autor pisze o złożoności obliczeniowej co powinno zostać zapisane jako wyznaczana jest metodą z nawrotami, której złożoność obliczeniowa jest wykładnicza...
- str. 70<sup>2</sup> Kolejne {kolumny} przedstawia {przedstawiają} wyniki dla algorytmu z nawrotami wyrażony w ms – jak można się domyślać autor pisze o czasie wykonania algorytmu co powinno zostać ujęte wprost np. kolejne kolumny przedstawiają czas wykonania algorytmu wyrażony w ms oraz uzyskane wyniki
- str. 768 charakteryzują się czasem wykładniczym – jak można się domyślać autor pisze o wykładniczej złożoności obliczeniowej

#### 4.3. Niedociągnięcia edytorskie, drobne błędy

- str. 21 (2.2) jest: hiperkrawędź, powinno być: hiper krawędź
- str. 24 podpis pod rysunkiem 2.5 ...hipergraf xt  $H_{XT}$  – niepoprawny nazewnictwo hipergraf klasy xt lub hipergraf transwersal dokładnych  $H_{XT}$  (ze względów praktycznych drugi sposób opisu wydaje się być wygodniejszym dla czytelnika)
- str. 27<sup>10</sup> jest: wkładniczym, powinno być: wykładniczym
- str. 30<sup>2</sup> jest: hiperkrawędzi, powinno być: hiperkrawędzi

- str. 30<sup>3</sup> jest: krawędzi, powinno być: hiperkrawędzi (w tym przypadku występują inne niejasności opisu)
- str. 30<sup>3</sup> jest:  $F * V_e(\min(R))$ , powinno być:  $F \cap V_e(\min(R))$  (występują tutaj dodatkowe niejasności zapisu, zakładając że ma to być część wspólna)
- str 30-32 sposób postępowania zapisany za pomocą listy wielopoziomowej – niespójność nadanych identyfikatorów np. poziom i oraz ii (str. 31)
- str.35<sup>7</sup> jest: ( (lewy nawias) powinno być: , (przecinek)
- str. 57<sup>4</sup> jest: ze, powinno być: że
- str. 58<sup>11</sup> jest: oskrzydło, powinno być: skrzydło
- str. 58<sup>4</sup> jest: garażu, powinno być: garażu
- str 65<sup>8</sup> jest: powiadał powinno być: posiadał, występują błędy logiczne w konstrukcji zdania wynikające z zamiany słów
- str. 70<sup>2</sup> jest: Kolejne przedstawia powinno być: Kolejne kolumny przedstawiają
- str 68, 70, 73<sup>6</sup>: Niejednoznaczność nazwy projektu testowego w tabelach 5.1 i 5.2 widnieje nazwa „crossroad SM” natomiast w opisie na stronie 73 CrossroadSM

## 5. Ocena końcowa rozprawy

Uważam, że przedstawione w rozprawie doktorskiej oryginalne metody dekompozycji sieci Petri z wykorzystaniem hipergrafów oraz elementów algebry liniowej, przeprowadzone eksperymenty weryfikacyjne oraz wzbogacenie ogólnodostępnej bazy HIPPO o opracowane algorytmy, wnoszą istotny wkład w rozwój dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Oprócz przedstawionej rozprawy doktorant jest współautorem 35 publikacji naukowych prezentujących zagadnienia związane z implementacją układów sterowania ze szczególnym uwzględnieniem wykorzystania sieci Petrii w procesie projektowania. Przedstawione artykuły doczekały się wielu cytowań przez inne zespoły badawcze, co wskazuje na pozytywne przyjęcie proponowanych rozwiązań. Należy nadmienić również, że doktorant brał udział w dwóch projektach badawczych dla młodych naukowców.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Łukasza Stefanowicza spełnia wymagania stawiane w ustawie „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”, zatem wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony i dalszych etapów przewodu doktorskiego w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja.

Adam Biliak