



---

Prof. dr hab. Marcin Szpyrka  
Akademia Górniczo-Hutnicza  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej  
Katedra Informatyki Stosowanej  
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
tel.: 012 617 51 94  
e-mail: mszpyrka@agh.edu.pl

---

Kraków, 14 października 2023 r.

## **Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Teofila Sidoruka pt. *State Space Reductions for Multi-agent Systems***

Rozprawa doktorska została opracowana na Politechnice Warszawskiej w dyscyplinie Informatyka techniczna i telekomunikacja. Recenzja została opracowana na wniosek Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej.

### **1. Cel i zakres rozprawy**

Rozprawa doktorska mgr. Teofila Sidoruka dotyczy metod redukcji przestrzeni stanów w formalnej weryfikacji systemów wieloagentowych. Zainteresowania doktoranta skupiają się wokół analizy własności, które można wyrazić za pomocą podzbioru logiki ATL\* oznaczanej w pracy jako sATL\*. Podstawowym założeniem stosowania dobrze określonych metod redukcji jest możliwość ich użycia bezpośrednio na etapie generowania przestrzeni stanów. Pozwala to na zrezygnowanie z generowania pełnej przestrzeni stanów, a co za tym idzie możliwa jest analiza bardziej złożonych systemów bez konieczności używania większych zasobów sprzętowych. Ponadto w pracy rozpatrywana są specjalizowane techniki redukcji, które można stosować dla systemów z topologią synchronizacji pomiędzy komponentami będącą drzewem oraz metody redukcji modelu wieloagentowego poprzez dążenie do zmimalizowania liczby agentów w systemie.

Rozwój metod weryfikacji modelowej w połączeniu z dostępem do coraz większej mocy obliczeniowej współczesnych systemów komputerowych powoduje, że zainteresowanie weryfikacją formalną jak i konieczność jej stosowania jest coraz częściej spotykana. Wraz ze wzrostem mocy obliczeniowej i dostępem do zasobów sprzętowych rośnie złożoność systemów współbieżnych, które chcemy analizować. Optymalizacji istniejących metod, czy też proponowanie nowych, które mogą pozwolić na skuteczną formalną weryfikację systemów współbieżnych jest jak najbardziej pożądana. Tematykę poruszaną w pracy należy więc uznać za ważną i aktualną.

Tezy pracy zostały formalnie zdefiniowane jako „*Redukcja częściowoporzędkowa dla liniowej logiki temporalnej może być dostosowana do weryfikacji zdolności strategicznych w asynchronicznych systemach wieloagentowych, a wyspecjalizowane techniki mogą przynieść dodatkowe korzyści, choć dla mniejszej klasy modeli.*”.

## 2. Struktura i zawartość rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska została przygotowana w języku angielskim. Praca składa się z sześciu rozdziałów wliczając w to wstęp i podsumowanie. Zawiera ponadto streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz literatury oraz indeks haseł. Praca liczy łącznie 97 stron. Wspomniany wykaz literatury zawiera łącznie 100 numerowanych pozycji, w tym dziewięć pozycji, w których współautorem jest doktorant.

- Rozdział 1 zawiera wprowadzenie do problematyki pracy, w szczególności przedstawiono w nim rys historyczny technik weryfikacji modelowej, problem eksplozji stanów i ideę redukcji częściowoporządkowej i jej znaczenie dla weryfikacji modelowej. Na zakończenie tego rozdziału przedstawiono tezy pracy.
- Rozdział 2 zawiera przede wszystkim wprowadzenie do teorii asynchronicznych systemów wieloagentowych (AMAS – Asynchronous Multi-agent System). Rozpoczyna się od formalnej definicji systemu AMAS zilustrowanej przykładem prostego kontrolera. Następnie przedstawiono definicję systemów interpretowanych z przeplotem (IIS – Interleaved Interpreted Systems), które definiują semantykę wykonania rozważanych systemów wieloagentowych. Drugi podrozdział zawiera składnię i semantykę logiki ATL\* (logika temporalna czasu alternującego). Następnie omówiono kluczowe pojęcia dotyczące systemów wieloagentowych takie jak strategia, wynik, zdarzenia niewidoczne, niezależność zdarzeń, sprawiedliwość, aktywność oponenta, radzenie sobie ze stanami końcowymi itp. Rozdział kończy przedstawienie rozszerzenia logiki ATL\* o właściwości epistemiczne i opis podzbioru logiki ATL\* określony jako sATL\* (simple ATL\*), na którym skupia się doktorant w kolejnych podrozdziałach. Wybrany podzbiór wyklucza użycie operatora *Next* oraz możliwość zagnieżdżania operatora modalnego dotyczącego strategii  $\langle\langle \rangle\rangle$ .
- Rozdział 3 na wstępie zawiera definicje odnoszące się do istniejącej redukcji częściowoporządkowych (POR) dla logiki temporalnej czasu liniowego (LTL). Następnie omówiono adaptację tej techniki dla logiki sATL\*. Warto podkreślić, że logika ta ma większą siłę ekspresji niż logika LTL. Doktorant udowodnił poprawność redukcji w w różnych wariantach semantycznych, uwzględniających zarówno strategię z pełną historią stanów jak i bezpamięciowe, subiektywną definicję zdolności strategicznej, a także rozszerzenie sATL\* o operator epistemiczny. W ostatniej części rozdziału przedstawiono zestaw benchmarków, które wykorzystano do praktycznej oceny zaproponowanego rozwiązania. Benchmarki te zaimplementowano z użyciem języka modelowania Promela, a do realizacji eksperymentów obliczeniowych wykorzystano weryfikator SPIN.
- W rozdziale 4 opisano dwie wyspecjalizowane techniki redukcji w oparciu o wzorce oraz o warstwy oraz udowodniono ich poprawność. Zastosowanie tych metod pokazano dla scenariuszy bezpieczeństwa reprezentowanych jako drzew ataku/obrony (ADTrees – Attack-Defence Trees), które przekształcono do postaci automatu skończenie stanowego (GUS – Guarded Update Systems). W rozdziale przedstawiono również składnię i semantykę takich automatów oraz zasadę translacji. Rozdział zawiera również wyniki eksperymentów z wykorzystaniem obu metod redukcji. Celem tego rozdziału jest pokazanie, że dla węższej grupy modeli z topologią synchronizacji pomiędzy komponentami będącą drzewem, możliwe jest opracowanie bardziej wydajnych metod redukcji (w porównaniu do POR).
- W rozdziale 5 analizowany jest problem redukcji rozmiaru modelu pod względem liczby agentów. Doktorant ponownie rozważa drzewa ataku/obrony, ale tym razem są one przekształcane do wyspecjalizowanej wersji asynchronicznych systemów wieloagentowych okre-

ślanych w pracy jako Extended AMAS. Nowa reprezentacja pozwala na rozważanie scenariuszy ataku/obrony w nowym kontekście, uwzględniającym liczbę agentów w przeciwnych koalicjach oraz ich konkretny przydział do poszczególnych zadań. Następnie omówiony został algorytm optymalnego planowania zadań z wykorzystaniem minimalnej liczby agentów i przedstawiono wyniki eksperymentów obliczeniowych z zastosowaniem tej metody. W porównaniu do metod rozważanych w poprzednich rozdziałach to rozwiązanie nie dotyczy kwestii redukcji przestrzeni stanów, ale optymalnego generowania modelu EAMAS na podstawie drzewa ataku/obrony tak, aby docelowa przestrzeń stanów była jak najmniejsza.

- Ostatni rozdział zawiera krótkie podsumowanie rozprawy oraz pewne sugestie prac badawczych mających być jej kontynuacją. Dotyczą one w szczególności próby przeniesienia rozwiązań z rozdziału 3 na inne logiki temporalne.

Warto podkreślić, że w rozdziałach 2–5 na wstępie przytoczono pozycje bibliograficzne doktoranta powiązane z danym rozdziałem oraz wskazano, jaki był merytoryczny wkład doktoranta w opracowanie poszczególnych artykułów. Ponadto na końcu każdego z tych rozdziałów zawarto przegląd bibliograficzny prac bezpośrednio powiązanych z tematem danego rozdziału (w pracy nie zawarto oddzielnego rozdziału, który zawierałby zwyczajowe state-of-the-art).

Prezentacja materiału przedstawionego w pracy dokonana jest w sposób relatywnie czytelny i zrozumiały. Stosowana terminologia i symbole nie budzą w zasadzie zastrzeżeń, choć ich duże nagromadzenie powoduje, że lektura rozprawy jest sporym wyzwaniem. Drobne uwagi dotyczące składu i języka prezentacji zawarto w dalszej części recenzji.

### 3. Ocena rozprawy

Główne wyniki naukowe opisane w rozprawie doktorskiej dotyczą redukcji przestrzeni stanów lub redukcji rozmiaru modelu wieloagentowego, co ma pozwolić efektywnie analizować bardziej złożone modele przy tych samych zasobach sprzętowych lub wręcz umożliwić analizę modeli, dla których nie możemy wygenerować pełnej przestrzeni stanów uwzględniającej wszystkie możliwe przeploty akcji. Podstawą prac badawczych doktoranta były istniejące metody redukcji częściowoporzędkowych logiki temporalnej czasu liniowego. Doktorant pokazał, że możliwe jest zaadaptowanie tych metod dla podzbioru logiki temporalnej czasu alternującego (sATL\*) o większej sile ekspresji niż logika czasu liniowego LTL.

Następnie przedstawiono dwie wyspecjalizowane metody, które są bardziej efektywne w sensie redukcji rozmiaru przestrzeni stanów, ale mogą być stosowane do modeli z topologią synchronizacji pomiędzy komponentami będącą drzewem.

Ostatni podejmowany w rozprawie wątek dotyczy redukcji samego modelu pod względem liczby agentów. Uzyskane wyniki są istotne zarówno z teoretycznego, jak i praktycznego punktu widzenia.

Do najważniejszych osiągnięć doktoranta przedstawionych w ocenianej rozprawie doktorskiej należy zaliczyć:

1. Udowodnienie, że redukcja częściowoporzędkowa (POR) dla logiki sATL\* jest poprawna. Dowody przedstawiono zarówno dla semantyki z  $\epsilon$ -przejściami, epistemicznego rozszerzenia logiki sATL\* oraz subiektywnej semantyki zdolności strategicznych. Wart podkreślenia jest fakt, że złożoność obliczeniowa dla zaproponowanej metody jest taka sama jak w przypadku logiki LTL.
2. Implementacja benchmarków dla redukcji częściowoporzędkowej dla logiki sATL\* w języku Promela i realizacja eksperymentów obliczeniowych w weryfikatorze SPIN. Prace te pokazują,

że opisane w pracy metody mogą być stosowane z użyciem narzędzi o uznanej pozycji międzynarodowej, jeżeli chodzi o weryfikację modelową.

3. Zdefiniowanie dwóch metod redukcji (dla modeli powstałych przez translację drzew ataku/obrony do automatu skończenie stanowego GUS) w oparciu o wzorce oraz o warstwy oraz udowodnienie ich poprawności.
4. Realizacja eksperymentów obliczeniowych dotyczących redukcji w oparciu o wzorce oraz o warstwy.
5. Opracowanie i udowodnienie poprawności algorytmu syntetyzującego optymalny harmonogram dla minimalnej liczby agentów dla danego drzewa ataku/obrony.

### 3.1. Uwagi

1. Ostatni punkt definicji 2.1.1 (str. 20) opisuje częściową lokalną funkcję przejść. Użyty zapis  $T_i \subseteq L_i \times Evt_i \times L_i$  nie wskazuje na funkcję. Sugeruje on możliwość wielu wartości, tj. dla danego stanu  $l_i$  i zdarzenia  $e$  może istnieć więcej niż jeden stan następny. Czy rzeczywiście takie zachowanie jest dostępne w rozważanych systemach wieloagentowych? Zapis ten budzi zastrzeżenia tym bardziej, że przedstawiona w definicji 2.1.3 globalna funkcja jest opisana rzeczywiście w formie funkcji  $T: St \times Evt \rightarrow St$ .
2. Definicja częściowej globalnej funkcji przejść (def. 2.1.3, str. 20) łączy w sobie warunek aktywności z efektem tej aktywności. Wydaje się, że przedstawienie tych aspektów w postaci dwóch definicji byłoby korzystniejsze z punktu widzenia czytelnika.
3. W zapisie gramatyki logiki ATL\* należało użyć symboli  $\varphi_1, \varphi_2, \gamma_1, \gamma_2$  analogicznie jak przy formule definiującej operator *Release*. Aktualny zapis sugeruje, że koniunkcja lub operator *Until* są stosowane do dwóch identycznych argumentów.
4. W definicjach 2.2.6 i 2.2.7 (str. 23) kilkakrotnie użyte jest oznaczenie *Agent*. Powinno być *Agt*.
5. W pracy używane jest sformułowanie, że opisywany podzbiór sATL\* ma **znaczaco** większą siłę ekspresji niż logika LTL. Jak należy rozumieć w tym kontekście termin **znaczaco**? Jakiego rodzaju własności istotne z perspektywy formalnej weryfikacji systemów wieloagentowych mogą być wyrażane w sATL\*, a nie mogą być wyrażone w LTL?
6. We wszystkich publikacjach, które są przywoływane na wstępie do rozdziałów 3–5 doktorant jest wymieniany na co najwyżej 3 pozycji, a często jest to pozycja ostatnia na liście autorów. Czy należy to rozumieć, że mimo wskazanego wkładu doktoranta w poszczególne publikacje był on stosunkowo niewielki, gdy weźmiemy całe publikacje pod uwagę? Czy w dokrobku doktoranta są publikacje, w których jest on wiodącym autorem?

### 3.2. Uwagi techniczno-redakcyjne

Pod względem edytorskim oceniana rozprawa doktorska lokuje się zdecydowanie powyżej przeciętnej. Została dość starannie złożona z użyciem systemu składu L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X. Tym niemniej autor nie ustrzegł się kilku „typowych” błędów, np.: używanie dwukropka zamiast polecenia `\colon` (np. przy definiowaniu funkcji), brak polecenia `\mathit{}` dla wieloliterowych oznaczeń w trybie matematycznym. W wersji drukowanej pracy zastosowano zdecydowanie zbyt małą czcionkę.

#### 4. Wniosek końcowy

Przedstawiona w pracy problematyka dotyczy aktualnych i interesujących zagadnień naukowych związanych z problemem redukcji przestrzeni stanów lub redukcji rozmiaru modeli w kontekście weryfikacji systemów wieloagentowych. Rozprawa doktorska zawiera szereg interesujących oryginalnych wyników pracy badawczej autora. Na uwagę zasługują zarówno aspekty teoretyczne (np. dowody poprawności), jak i eksperymenty obliczeniowe opracowane i zrealizowane przez doktoranta. Mimo przedstawionych wcześniej drobnych uwag krytycznych, rozprawę doktorską jako całość oceniam zdecydowanie pozytywnie.

Stwierdzam, że autor wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie Informatyka techniczna i telekomunikacja, trafnie sformułował problem naukowy i następnie przedstawił jego oryginalne rozwiązanie. Podsumowując, stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska pt. *State Space Reductions for Multi-agent Systems* spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez ustawę *Prawo o Szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018 r. (z późniejszymi zmianami) i wnoszę o dopuszczenie mgr. Teofila Sidoruka do publicznej obrony.

