

# Recenzja rozprawy doktorskiej

Recenzja dotyczy rozprawy doktorskiej mgr inż. Damiana Kurpiewskiego pod tytułem „E-voting, Card Games, and Drone Teams: Verification of Strategic Properties in Multi-Agent Systems with Imperfect Information”, przygotowanej pod kierunkiem prof. dr hab. Wojciecha Jamrogi w Instytucie Podstaw Informatyki PAN.

## 1. Charakterystyka ogólna pracy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy problematyki formalnej weryfikacji systemów wieloagentowych z niepełną informacją, ze szczególnym uwzględnieniem logik strategicznych, w tym logiki ATL z niepełną informacją i strategiami bez pamięci. Praca koncentruje się na opracowaniu metod poprawiających praktyczną wykonalność weryfikacji modelowej w tym obszarze, w szczególności poprzez zastosowanie aproksymacji, redukcji przestrzeni stanów oraz technik syntezy strategii.

Autor podejmuje istotny i aktualny problem badawczy, jakim jest luka pomiędzy wysoką złożonością teoretyczną weryfikacji logiki strategicznej a jej praktyczną użytecznością w analizie realistycznych systemów. Rozprawa obejmuje zarówno komponent teoretyczny (definicje formalne, algorytmy), jak i implementacyjny (narzędzie STV), a także szeroki zestaw eksperymentów na modelach inspirowanych rzeczywistymi zastosowaniami.

## 2. Streszczenie pracy

### Rozdział 1 – Wprowadzenie

Rozdział przedstawia motywację pracy, koncentrując się na problemie weryfikacji strategicznej w systemach wieloagentowych z niepełną informacją oraz jej wysokiej złożoności obliczeniowej. Autor odwołuje się do systemów głosowania elektronicznego jako przykładowego obszaru zastosowań, a następnie formułuje cele pracy, obejmujące opracowanie metod poprawiających praktyczną wykonalność weryfikacji ATL.

### Rozdział 2 – Podstawy teoretyczne

W rozdziale przedstawiono formalne podstawy wykorzystywane w pracy, w tym definicje modeli systemów wieloagentowych, logiki ATL oraz jej wariantów dla niepełnej informacji. Omówiono również pojęcia relacji nierozróżnialności, wiedzy epistemicznej oraz strategii, które stanowią fundament dalszych rozważań.

### Rozdział 3 – Złożoność i ograniczenia weryfikacji

Rozdział analizuje trudności związane z weryfikacją ATL przy niepełnej informacji, w szczególności wysoką złożoność obliczeniową oraz problemy wynikające z konieczności rozważania strategii jednolitych epistemicznie, czyli takich, w których koalicja podejmuje tę samą decyzję we wszystkich sytuacjach, których nie potrafi od siebie odróżnić. Autor uzasadnia potrzebę stosowania metod aproksymacyjnych i redukcyjnych.

## **Rozdział 4 – Metody aproksymacyjne**

W rozdziale zaproponowano podejście oparte na dolnych i górnych przybliżeniach własności strategicznych, czyli takich stanów, w których wiemy na pewno, że własność zachodzi, oraz takich, w których być może zachodzi (nie da się wykluczyć). Przedstawiono wykorzystanie technik stałopunktowych oraz translacji do logik wiedzy, umożliwiających efektywniejszą analizę modeli kosztem częściowej utraty precyzji.

## **Rozdział 5 – Redukcja przestrzeni stanów**

Autor omawia techniki ograniczania rozmiaru analizowanych modeli, w tym różne formy abstrakcji oraz optymalizacje inspirowane redukcjami częściowego porządku. Zaproponowane podejścia mają na celu zmniejszenie eksplozji przestrzeni stanów i poprawę wydajności obliczeń.

## **Rozdział 6 – Synteza strategii**

Rozdział poświęcony jest metodom konstrukcji strategii dla koalicji agentów, opartym na przeszukiwaniu przestrzeni decyzji (m.in. DFS). Kluczową rolę odgrywa wykorzystanie relacji dominacji, pozwalającej na eliminację strategii gorszych i ograniczenie złożoności przeszukiwania.

## **Rozdział 7 – Implementacja narzędzia**

W rozdziale przedstawiono implementację zaproponowanych metod w postaci narzędzia STV. Omówiono architekturę systemu, sposób integracji poszczególnych komponentów oraz możliwości zastosowania narzędzia do analizy modeli.

## **Rozdział 8 – Ewaluacja eksperymentalna**

Autor prezentuje wyniki eksperymentów przeprowadzonych na różnych modelach systemów wieloagentowych. Analiza obejmuje porównanie wydajności zaproponowanych metod z podejściami klasycznymi oraz ocenę ich skalowalności i efektywności.

## **Rozdział 9 – Podsumowanie i wnioski**

W końcowym rozdziale autor podsumowuje uzyskane wyniki oraz wskazuje możliwe kierunki dalszych badań, w tym rozwój metod dla bardziej złożonych modeli i rozszerzenie ich zakresu zastosowań.

# **3. Ocena problemu badawczego i jego sformułowania**

Tematyka pracy jest bez wątpienia istotna i dobrze osadzona w aktualnych kierunkach badań nad systemami wieloagentowymi oraz formalną weryfikacją. Problem skalowalności weryfikacji modelowej dla logik strategicznych z niepełną informacją pozostaje jednym z istotnych wyzwań w tej dziedzinie.

Należy jednak zauważyć, że **sformułowanie problemu badawczego w pracy nie jest dostatecznie precyzyjne i jednoznaczne**. W szczególności:

- W tytule uwypuklony jest praktyczny aspekt weryfikacji trzech typów systemów przy pomocy logik strategicznych z niepełną wiedzą.
- w początkowych rozdziałach silnie eksponowany jest kontekst systemów głosowania elektronicznego (ang. e-voting), co sugeruje, że jest to główny obszar zastosowań,
- jednak w przykładach brany jest pod uwagę jedynie aspekt dokonania głosowania i przymuszenia, nie odnosząc się do kilku istotnych aspektów jak rejestracja głosujących, sprawdzanie na listach, niezaprzeczalność głosu, weryfikacja zliczenia indywidualnego głosu i ogólnych wyników, oraz zabezpieczenie przed przymuszeniem przy pomocy wielokrotnego głosowania; aspekty te w różnym stopniu mogą podlegać weryfikacji modelowej,
- w dalszej części pracy zakres ten ulega znacznemu rozszerzeniu na bardzo zróżnicowane klasy systemów (gry, systemy robotyczne, drony, modele abstrakcyjne).

W rezultacie powstaje wrażenie **niespójności narracyjnej**, polegającej na rozbieżności między motywacją przedstawioną w tytule, w początkowych rozdziałach, oraz w rzeczywistym zakresie badań. Praca ma w istocie charakter metodologiczny i ogólny, co jest jej silną stroną, natomiast wstęp sugeruje ukierunkowanie aplikacyjne w określonych dziedzinach.

## 4. Ocena zbioru publikacji będącej podstawą pracy

Komunikowanie wyników badań społeczności naukowej jest równie istotne co sam wkład badawczy. Chociaż lista publikacji doktoranta jest imponująca, to mam jednak pewne istotne uwagi. Nie będę formułował zarzutów wobec listy publikacji, tylko opiszę, czego oczekiwałbym od badacza wkraczającego na ścieżkę samodzielnej pracy.

Ponieważ praca ma silny komponent teoretyczny, uważam, że doktorant powinien zawrzeć podstawowe tezy zaproponowanych metod w co najmniej dwóch wysoko punktowanych publikacjach sygnowanych wyłącznie przez niego lub wspólnie z promotorem, w tym co najmniej jedna publikacja w uznanym czasopiśmie naukowym. Tego wyraźnie zabrakło.

## 5. Ocena wkładu naukowego

Do najważniejszych osiągnięć autora należą:

1. **Opracowanie metod aproksymacyjnej weryfikacji ATL z niepełną informacją**  
Autor proponuje podejście oparte na przybliżeniach dolnych i górnych, które pozwala obejść wysoką złożoność klasycznej weryfikacji ATL przy niepełnej informacji. W szczególności wykorzystuje techniki stałopunktowe oraz translację do logik wiedzy, umożliwiając redukcję problemu strategicznego do analizy własności wiedzy agentów.
2. **Zastosowanie redukcji przestrzeni stanów**  
W pracy zastosowano techniki ograniczające rozmiar analizowanych modeli, w tym różne formy abstrakcji oraz optymalizacje inspirowane redukcjami częściowego porządku. Pozwala to znacząco zmniejszyć liczbę stanów i przejść podlegających analizie, co bezpośrednio przekłada się na poprawę skalowalności metod.
3. **Rozwój metod syntezy strategii**  
Autor rozwija procedury konstrukcji strategii oparte na przeszukiwaniu przestrzeni decyzji, w szczególności z wykorzystaniem schematów DFS. Kluczowym elementem

jest wprowadzenie relacji dominacji, która umożliwi eliminację strategii gorszych i ograniczenie eksplozji kombinatorycznej.

#### 4. **Implementacja narzędzia STV**

Zaproponowane metody zostały zaimplementowane w postaci narzędzia STV, które integruje wszystkie główne komponenty podejścia. Implementacja ta potwierdza praktyczną wykonalność koncepcji oraz umożliwia ich zastosowanie do analizy konkretnych modeli.

#### 5. **Przeprowadzenie szerokiej ewaluacji eksperymentalnej**

Autor przeprowadza liczne eksperymenty na zróżnicowanych modelach, obejmujących różne klasy systemów wieloagentowych. Wyniki empiryczne pokazują skuteczność zaproponowanych metod oraz ich przewagę w zakresie skalowalności względem podejść klasycznych.

Wkład ten należy ocenić jako znaczący, zwłaszcza w kontekście prób zwiększenia praktycznej wykonalności metod weryfikacyjnych.

## 6. Ocena poprawności metod i eksperymentów

Zaproponowane metody są zasadniczo poprawne i dobrze umotywowane. Szczególnie wartościowe jest połączenie różnych technik (aproksymacja, redukcja, synteza strategii) w jeden spójny potok obliczeniowy.

Eksperymenty są rozbudowane i obejmują różnorodne scenariusze, co stanowi mocną stronę pracy. Autor wykazuje znaczące przyspieszenia w stosunku do metod bazowych oraz zdolność analizy modeli o dużej liczbie stanów.

Jednocześnie należy wskazać istotne ograniczenia:

- brak systematycznej analizy dokładności aproksymacji (np. zależności szerokości przedziałów między dolnymi i górnymi oszacowaniami od różnych parametrów modelu),
- brak jednoznacznego określenia klas modeli, dla których metody są najbardziej efektywne,
- ograniczona analiza przypadków, w których metody zawodzą lub tracą efektywność,
- brak odniesienia się do aspektu sprawiedliwości, która może mieć wpływ zarówno na wynik weryfikacji, jak i na złożoność,
- oparcie się na modelu synchronicznym koordynacji agentów (choć nazwano go asynchronicznym), co limituje zastosowanie metody do systemów rozproszonych.

## 7. Spójność pracy

Struktura pracy jest logiczna na poziomie technicznym, jednak cierpi na brak spójności narracyjnej:

- Tytuł pracy dotyczy zastosowania logik strategicznych z niepełną informacją w trzech zastosowaniach (głosowanie, rój dronów i gry karciane).
- Wprowadzenie i początkowe rozdziały sugerują koncentrację na dwóch wybranych aspektach elektronicznego głosowania,

- Część teoretyczna rozwija ogólne metody,
- Eksperymenty obejmują szeroką gamę niejednorodnych modeli,
- Wnioski ponownie odnoszą się do szerokiego spektrum zastosowań, bez wyraźnego powiązania z pierwotną motywacją.

W rozdziałach 1-4 należałoby bardziej urozmaicić przykłady. Ponadto, brakuje jasno określonej osi przewodniej, którą mogłoby być jedno główne studium przypadku, tzw. „duży przykład”, prowadzony konsekwentnie przez całą pracę.

## 8. Krytyczna ocena modelu systemów i jego adekwatności

Jednym z najpoważniejszych problemów pracy jest sposób modelowania współpracy agentów.

Autor deklaruje analizę systemów asynchronicznych, jednak rozważane modele opierają się na synchronicznych akcjach współdzielonych przez wielu agentów, co odpowiada raczej semantyce systemów synchronicznych lub quasi-synchronicznych.

W szczególności:

- akcje wieloagentowe wymagają jednoczesnego uczestnictwa wielu agentów,
- brak jest pełnej niezależności czasowej działań agentów,
- brak jest naturalnego modelowania przeplotów (ang. interleaving semantics) typowego dla systemów rozproszonych.

Rozważmy model składający się z 3 agentów A, B i C. Agent B może w pewnej chwili wykonać akcję ba wspólną z A lub bc wspólną z C. Jeżeli wykona akcję ba, to umożliwiona akcja bc staje się zabroniona. Wymaga to albo dostępu do nielokalnej wiedzy (jakiś sposób uwspólnienia lub koordynacji stanów agentów) albo ukrytej komunikacji na niższym poziomie abstrakcji.

Można byłoby przejść na tym do porządku, uznając, że autor po prostu nazywa systemy synchroniczne asynchronicznymi, gdyby nie istotne reperkusje dla modelowania systemów rozproszonych, na przykład roju dronów, który jest jednym z przykładów. Dostęp do nielokalnej wiedzy jest tu nierealistyczny, a ukryta komunikacja jest zbytnią abstrakcją ukrywającą istotne własności systemu rozproszonego.

W konsekwencji:

- określenie tych modeli jako „asynchronicznych” jest metodologicznie wątpliwe,
- zaproponowane podejście nie odzwierciedla kluczowych cech rzeczywistych systemów rozproszonych, takich jak:
  - brak globalnego zegara,
  - niezależność lokalnych decyzji,
  - opóźnienia komunikacyjne.

Ponadto praca nie analizuje aspektu sprawiedliwości (ang. fairness) przyjętego modelu, mimo że założenia tego typu odgrywają istotną rolę w weryfikacji systemów współbieżnych i rozproszonych. W szczególności brak ograniczeń sprawiedliwości może prowadzić do uwzględniania niefizycznych przebiegów, w których działania niektórych agentów są nieskończenie odkładane, co wpływa na interpretację własności strategicznych. W konsekwencji uzyskane wyniki mogą być częściowo artefaktem przyjętej semantyki wykonania, a ich odniesienie do realistycznych scenariuszy pozostaje ograniczone.

To prowadzi do istotnego ograniczenia: **metody przedstawione w pracy mają ograniczoną adekwatność do weryfikacji rzeczywistych systemów rozproszonych.**

## 9. Słabe strony pracy

Do najważniejszych słabości należą:

### 1. **Niespójność między motywacją a zakresem pracy**

We wprowadzeniu praca jest silnie motywowana problematyką elektronicznego głosowania, jednak zasadnicza część analiz i eksperymentów dotyczy ogólnych modeli systemów wieloagentowych. Analiza głosowania, zapowiedziana nawet w tytule, ogranicza się do jego dwóch aspektów: aktu głosowania i przymuszenia. Powoduje to rozbieżność między deklarowanym kontekstem aplikacyjnym a rzeczywistym zakresem badań.

### 2. **Użycie pojęcia asynchroniczności**

Autor posługuje się pojęciem asynchroniczności, jednak przyjęty model zakłada istnienie działań wymagających jednoczesnej koordynacji wielu agentów w ramach wspólnych kroków. W efekcie semantyka systemu ma istotne cechy synchroniczności, co osłabia trafność użytej terminologii.

### 3. **Brak odniesienia do sprawiedliwości (ang. fairness), zarówno słabej jak silnej, i jego konsekwencje**

W pracy nie uwzględniono założeń sprawiedliwości (np. sprawiedliwości przepłotu czy warunków sprawiedliwego planowania), które są standardowo stosowane w analizie systemów współbieżnych i rozproszonych. W konsekwencji wyniki mogą dopuszczać lub wykluczać zachowania artefaktowe (np. nieskończone odkładanie działań niektórych agentów), co wpływa na interpretację własności strategicznych oraz ogranicza adekwatność uzyskanych rezultatów do realistycznych scenariuszy wykonania.

### 4. **Ograniczona adekwatność do rzeczywistych systemów rozproszonych**

Z uwagi na uproszczony, synchroniczny model interakcji, nieuwzględniający pełnej niezależności działań agentów ani opóźnień komunikacyjnych, oraz nieuwzględnienie aspektu sprawiedliwości, przedstawione podejście tylko częściowo odpowiada charakterystyce rzeczywistych systemów rozproszonych. Ogranicza to możliwość bezpośredniego zastosowania zaproponowanych metod w praktycznych scenariuszach.

### 5. **Brak pogłębionej analizy błędów aproksymacji**

Choć praca wykorzystuje podejście aproksymacyjne, nie przedstawiono systematycznej analizy rozbieżności między dolnymi i górnymi przybliżeniami ani czynników wpływających na jej wielkość. W szczególności brakuje ilościowej oceny częstości i znaczenia wyników nierozstrzygających, oraz ich zależności od różnych cech modelu, jak na przykład licznosc poszczególnych koalicji.

6. **Dominacja koalicji jednoelementowych w analizie**  
Znaczna część przykładów i eksperymentów dotyczy koalicji jednoagentowych, co upraszcza analizę problemu strategicznego. Ogranicza to jednak możliwość oceny zachowania zaproponowanych metod w pełnym kontekście współdziałania wielu agentów, gdzie pojawiają się dodatkowe trudności koordynacyjne i epistemiczne, związane z koniecznością koordynacji decyzji przy niepełnej i niesymetrycznej wiedzy agentów oraz braku możliwości ich bieżącej synchronizacji.
7. **Brak wyraźnego określenia ograniczeń metod**  
Autor nie formułuje jednoznacznie granic stosowalności zaproponowanych metod ani scenariuszy, w których mogą one tracić efektywność lub precyzję. Utrudnia to ocenę ich praktycznej użyteczności oraz świadome stosowanie w różnych klasach modeli.
8. **Niedostateczne pozycjonowanie względem istniejących podejść teoretycznych**  
Choć praca odnosi się do literatury, brakuje pogłębionego porównania zaproponowanych metod z alternatywnymi podejściami teoretycznymi, w szczególności pod względem ich założeń, zakresu stosowalności i złożoności. Ogranicza to możliwość pełnej oceny wkładu na tle istniejących rozwiązań.

## 10. Mocne strony pracy

Pomimo wskazanych zastrzeżeń, praca posiada istotne zalety:

1. **Znaczący wkład w rozwój praktycznych metod weryfikacji ATL**  
Praca wnosi istotny postęp w kierunku uczynienia weryfikacji ATL z niepełną informacją bardziej wykonalną w praktyce, poprzez wprowadzenie metod aproksymacyjnych i optymalizacyjnych. Zaproponowane rozwiązania pozwalają analizować modele o skali niedostępnej dla podejść klasycznych, co zwiększa ich użyteczność w zastosowaniach.
2. **Integracja wielu technik w jedną spójną metodologię**  
Autor skutecznie łączy różnorodne podejścia — aproksymację, redukcję przestrzeni stanów, syntezę strategii oraz elementy logik epistemicznych — w jednolity schemat analizy. Taka integracja zwiększa efektywność całego podejścia i świadczy o dojrzałości koncepcyjnej pracy.
3. **Implementacja działającego narzędzia**  
Zaproponowane metody zostały zaimplementowane w postaci funkcjonalnego narzędzia, co potwierdza ich praktyczną wykonalność. Implementacja umożliwia bezpośrednie zastosowanie wyników pracy do analizy konkretnych modeli oraz stanowi solidną bazę do dalszego rozwoju.
4. **Szeroka i przekonująca ewaluacja eksperymentalna**  
Autor przeprowadza rozbudowane eksperymenty na różnych klasach modeli, co pozwala ocenić działanie metod w zróżnicowanych scenariuszach. Wyniki są przedstawione w sposób czytelny i wskazują na realne korzyści w zakresie skalowalności i efektywności.
5. **Dobre osadzenie w literaturze i aktywność publikacyjna autora**  
Praca jest osadzona w kontekście istniejących badań nad logikami strategicznymi i systemami wieloagentowymi, a autor wykazuje znajomość kluczowej literatury. Dodatkowo, wyniki badań zostały opublikowane, co potwierdza ich wartość oraz aktywność naukową autora.

# 11. Uwagi do poszczególnych rozdziałów

## Rozdział 1 – Wprowadzenie

Treść: motywacja.

**Uwaga:** Motywacja oparta na systemach głosowania, a w szczególności tylko na dwóch ich aspektach: akcie głosowania i przymuszeniu, nie znajduje pełnego odzwierciedlenia w dalszej części pracy, co prowadzi do niespójności między wprowadzeniem a rzeczywistym zakresem analiz.

## Rozdział 2 – Podstawy teoretyczne

Treść: podstawy formalne.

**Uwaga:** Prezentacja jest poprawna, jednak mogłaby wyraźniej eksponować elementy bezpośrednio wykorzystywane w dalszych rozdziałach. W weryfikacji modelowej bardzo istotna jest kwestia sprawiedliwości, ponieważ wpływa zarówno na semantykę modeli, jak i może determinować wynik weryfikacji. W prezentacji formalizmów nie uwzględniono standardowych pojęć sprawiedliwości: słabej i silnej. Wprowadzono semantykę systemu wieloagentowego, nazywając ją asynchroniczną, jednak definicja określa synchroniczne wykonywanie wspólnych akcji agentów jako sposób ich koordynacji.

## Rozdział 3 – Złożoność i ograniczenia weryfikacji

**Uwaga:** Analiza dobrze uzasadnia potrzebę stosowania aproksymacji, jednak pozostaje na poziomie ogólnym i nie prowadzi do scharakteryzowania skali problemu w kontekście dalszych eksperymentów. Brakuje ilościowej charakterystyki skali problemu (w funkcji parametrów modelu: liczba stanów, liczba klas epistemicznych, średni rozmiar klas, liczba agentów, stopień niedeterministyczności itp.) oraz jej powiązania z eksperymentami, co utrudnia interpretację wyników i ocenę ich reprezentatywności. Analiza trudności weryfikacyjnych nie uwzględnia w wystarczającym stopniu wpływu liczności koalicji (z powodu użycia w większości przypadków koalicji jednoagentowych), co jest istotne dla pełnego obrazu złożoności problemu. Brak analizy sprawiedliwości weryfikacji, zarówno słabej, jak i silnej.

## Rozdział 4 – Metody aproksymacyjne

**Uwaga:** Choć podejście jest interesujące, brakuje systematycznej analizy jakości aproksymacji, w szczególności czynników wpływających na rozbieżność wyników (czyli szerokości korytarza pomiędzy aproksymacją dolną i górną) oraz na częstość przypadków nierozstrzygających (znajdujących się w korytarzu). Brak dyskusji o tym, jak przyjęta semantyka (synchroniczna w aspekcie koordynacji agentów) wpływa na poprawność aproksymacji. Aproksymacja jest rozważana bez uwzględnienia założeń sprawiedliwości, co może prowadzić do nadmiernie pesymistycznych lub optymistycznych przybliżeń.

## Rozdział 5 – Redukcja przestrzeni stanów

**Uwaga:** Brakuje pogłębionego porównania skuteczności poszczególnych technik oraz analizy ich wpływu na końcowe wyniki weryfikacji. Nie analizuje się wpływu redukcji na zachowanie własności sprawiedliwości. Zastosowane optymalizacje inspirowane redukcją częściowego porządku są omawiane bez odniesienia do klasycznych założeń asynchroniczności, dla których te techniki są pierwotnie przeznaczone (analizując synchroniczne w gruncie rzeczy modele).

## **Rozdział 6 – Synteza strategii**

Treść: przeszukiwanie przestrzeni decyzji, relacja dominacji.

**Uwaga:** Analiza skupia się głównie na prostszych przypadkach (często w koalicjach jednoagentowych), przez co trudno ocenić, jak metoda działa w bardziej złożonych sytuacjach z koalicji wieloagentowych. Dodatkowo przyjmuje się, że agenci mogą podejmować wspólne decyzje w jednym momencie, co odpowiada raczej modelowi synchronicznemu niż typowym systemom rozproszonym. Wreszcie, przy wykorzystaniu relacji dominacji nie przeanalizowano kosztu jej sprawdzania ani tego, czy zysk z jej użycia przewyższa ten koszt.

## **Rozdział 7 – Implementacja narzędzia**

**Uwaga:** Opis implementacji mógłby zawierać więcej szczegółów dotyczących wydajności oraz ograniczeń praktycznych narzędzia. Implementacja odzwierciedla przyjętą semantykę modelu, jednak brak jest dyskusji, jak zmieniłaby się architektura narzędzia w przypadku pełnej asynchroniczności oraz uwzględnienia aspektu sprawiedliwości.

## **Rozdział 8 – Ewaluacja eksperymentalna**

Treść: przykłady, analiza wydajności, skalowalności i efektywności.

**Uwaga:** Ewaluacja jest szeroka, lecz brakuje systematycznej analizy parametrycznej oraz dokładniejszego powiązania wyników z konkretnymi właściwościami modeli. W szczególności, można przeanalizować wielkość zredukowanego zbioru strategii, koszt obliczeń i szerokość korytarza w zależności od parametrów takich jak struktura systemu (liczba agentów, rozmiary koalicji, rozmiar przestrzeni stanów, stopień współdzielenia zdarzeń przez agenty), parametry informacyjne (wielkość klas epistemicznych, ograniczenia pamięci w strategiach), akcje wspólne agentów (liczba zdarzeń wspólnych, ile agentów musi współuczestniczyć), parametry algorytmu. Eksperymenty w dużej mierze koncentrują się na prostszych konfiguracjach, w tym koalicjach jednoagentowych, co ogranicza możliwość oceny skalowalności dla bardziej złożonych scenariuszy. Nie analizuje się wpływu założeń sprawiedliwości na wyniki eksperymentów.

## **Rozdział 9 – Podsumowanie i wnioski**

**Uwaga:** Wnioski są trafne, jednak mogłyby wyraźniej eksponować ograniczenia zaproponowanych metod oraz warunki ich stosowalności. W szczególności, wnioski nie eksponują w wystarczającym stopniu ograniczeń wynikających z przyjęcia synchronicznej semantyki koordynacji agentów, pominięcia sprawiedliwości oraz dominacji prostych przypadków (jednoagentowych koalicji) w analizie.

## 12. Opinia końcowa recenzenta rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska poświęcona jest problematyce formalnej weryfikacji systemów wieloagentowych z niepełną informacją, ze szczególnym uwzględnieniem poprawy praktycznej wykonalności metod opartych na logikach strategicznych. Autor podejmuje istotny i aktualny problem badawczy, który pozostaje jednym z kluczowych wyzwań w obszarze metod formalnych i systemów wieloagentowych.

W pracy zaproponowano spójne podejście łączące techniki aproksymacji, redukcji przestrzeni stanów oraz syntezy strategii. Istotnym elementem rozprawy jest również implementacja zaproponowanych metod oraz ich ewaluacja eksperymentalna na szeregu modeli testowych. Uzyskane wyniki wskazują na poprawę skalowalności w stosunku do podejść klasycznych, co stanowi wartościowy wkład w rozwój narzędzi weryfikacyjnych dla systemów wieloagentowych.

Rozprawa zawiera jednak pewne ograniczenia, które należy odnotować:

- Analiza opiera się w znacznym stopniu na uproszczonych przypadkach, w tym koalicjach jednoagentowych, bez systematycznego badania wpływu liczności koalicji na wyniki.
- Przyjęty model interakcji agentów zawiera elementy synchroniczności, co ogranicza jego adekwatność do w pełni asynchronicznych systemów rozproszonych.
- Brakuje analizy aspektu sprawiedliwości, który może wpłynąć zarówno na wynik weryfikacji, jak i na szerokość korytarza i złożoność.
- Aproksymacyjny charakter zaproponowanych metod nie został w pełni scharakteryzowany ilościowo, w szczególności w zakresie przypadków nierozstrzygających.
- Występuje pewna niespójność między motywacją przedstawioną we wprowadzeniu a zakresem analizowanych przykładów.

Wskazane uwagi mają jednak charakter uzupełniający i nie podważają zasadniczego wkładu naukowego rozprawy. Przedstawione wyniki są oryginalne, poprawne metodologicznie i mają istotne znaczenie dla dalszego rozwoju badań w tej dziedzinie. Przedstawione w recenzji usterki mogą w części zostać potraktowane jako program kontynuacji badań.

## 13. Wniosek

Stwierdzam, że rozprawa doktorska spełnia wymagania określone w obowiązujących przepisach dotyczących nadawania stopnia doktora, w szczególności w zakresie:

- oryginalności rozwiązania problemu naukowego,
- ogólnej wiedzy teoretycznej autora w danej dyscyplinie,
- umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie rozprawy do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

**W związku z powyższym uważam, że rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim i może stanowić podstawę do nadania stopnia doktora.**

## 14. Pytania do doktoranta

### 1. Zakres pracy i motywacja

We pierwszych rozdziałach praca jest silnie motywowana systemami głosowania elektronicznego, i to ograniczonymi do dwóch aspektów: oddania głosu i przymuszenia, natomiast dalsze rozdziały mają charakter ogólny.

**Czy mógłby Pan jednoznacznie określić zakres pracy oraz wskazać, które elementy rzeczywistych systemów głosowania zostały pominięte i dlaczego?**

### 2. Asynchroniczność i model obliczeń

W pracy używa Pan pojęcia asynchroniczności, przy jednoczesnym modelowaniu interakcji wymagających synchronicznych akcji agentów.

**Jak należy precyzyjnie interpretować asynchroniczność w Pana modelu oraz jakie są konsekwencje przyjętej semantyki dla adekwatności względem systemów rozproszonych?**

### 3. Założenia sprawiedliwości (ang. fairness)

W rozprawie nie uwzględniono explicite założeń sprawiedliwości, słabej i silnej.

**Czy rozważał Pan ich wprowadzenie i jaki byłby ich wpływ na wyniki weryfikacji oraz interpretację własności strategicznych, szerokość korytarza pomiędzy dolną i górną aproksymacją oraz złożoność weryfikacji?**

### 4. Aproksymacja i wyniki nierozstrzygające

Metody w pracy mają charakter aproksymacyjny.

**Czy analizował Pan ilościowo rozbieżność między dolnym i górnym przybliżeniem oraz czynniki wpływające na pojawianie się wyników nierozstrzygających? W szczególności: na przykład licznosc koalicji, synchroniczność modelu, sprawiedliwość, złożoność.**

### 5. Relacja dominacji i koszt obliczeń

W syntezie strategii wykorzystuje Pan relację dominacji.

**Czy analizował Pan koszt sprawdzania dominacji i jego wpływ na całkowitą wydajność algorytmu?**

### 6. Koalicje wieloagentowe

Znaczna część przykładów dotyczy koalicji jednoagentowych.

**Jak zaproponowane metody skalują się dla większych koalicji oraz czy analizował Pan wpływ licznosci koalicji na złożoność i jakość wyników?**

## 7. Zakres stosowalności i ograniczenia metod

Praca przedstawia skuteczne podejście eksperymentalne.

**Czy mógłby Pan jasno określić główne ograniczenia zaproponowanych metod oraz wskazać scenariusze, w których mogą one być najmniej efektywne lub trudne do zastosowania?**

Falenty Nowe, 6.05.2026

Wiktor Daszczuk

