

# Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Żychowskiego p.t. “Zastosowanie algorytmów ewolucyjnych w wielokrokowych Grach Obronnych Stackelberga”

## 1. Tematyka rozprawy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Żychowskiego jest szeroko rozumiana teoria gier, a dokładniej szczególna klasa dwuosobowych asymetrycznych wielokrokowych gier zwanych grami obronnymi Stackelberga. Szczegółowość tych gier polega na ich asymetrycznym charakterze: drugi gracz, zwany tradycyjnie Atakującym, ma przewagę nad pierwszym graczem (Obróńcą) w postaci znajomości jego strategii. Gry obronne Stackelberga są nie tylko interesującym przedmiotem badań teoretycznych, ale znajdują też wiele zastosowań praktycznych, w których Obróńca ma za zadanie chronienie pewnej infrastruktury przy pomocy ograniczonych zasobów, a Atakujący próbuje wykorzystać braki zasobowe Obróńcy, przeprowadzając ataki na wybrane elementy infrastruktury.

W kategoriach teoretycznych centralnym pojęciem rozprawy jest równowaga Stackelberga, definiująca lokalnie optymalny zbiór strategii graczy, to jest taki w którym żaden z nich nie ma przesłanek do zmiany swojej strategii *ceteris paribus*, tj. przy ustalonych strategiach przeciwnika. Praca koncentruje się na wypracowywaniu nowych, efektywnych algorytmów znajdowania tej równowagi. Jedną z głównych motywacji dla rozprawy są ograniczenia algorytmów, które charakteryzują się wysoką złożonością obliczeniową (problem jest NP-trudny) oraz znacznym zapotrzebowaniem na pamięć operacyjną. W odpowiedzi na te wyzwania, Doktorant proponuje rodzinę algorytmów heurystycznych opartych na metaheurystyce obliczeń ewolucyjnych. Głównym wskaźnikiem rezultatu (metryką) wykorzystywaną w pracy jest procent instancji problemu dla których porównywane algorytmy znajdują rozwiązanie optymalne, to jest dokładny stan równowagi Stackelberga, w ramach założonego budżetu nakładów obliczeniowych i dostępnej pamięci

operacyjnej. W szerszym kontekście, rozprawa mgr Żychowskiego eksploatuje wszechobecny i bardzo istotny w praktyce przetarg pomiędzy jakością rozwiązań otrzymywanych w optymalizacji oraz nakładami obliczeniowymi niezbędnymi do ich znalezienia.

Praca jednoznacznie wpisuje się w obszar dziedziny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja.

## 2. Ocena treści rozprawy i wkładu oryginalnego

### 2.1 Treść rozprawy

Rozprawa została przygotowana w języku polskim, składa się z 10 rozdziałów i ma objętość 136 stron bez bibliografii. Po wprowadzeniu i postawieniu głównej hipotezy badawczej w rozdziale 1, w rozdziałach 2 i 3 Doktorant zwięźle prezentuje wymagane podstawy teoretyczne i definiuje klasę gier obronnych Stackelberga. W rozdziale 4 dokonuje on przeglądu algorytmów zaprojektowanych z myślą o znajdowaniu stanów równowagi Stackelberga, dzieląc je na metody dokładne i przybliżone, i koncentrując się jedynie na algorytmach uniwersalnych, co jest uzasadnione szerokim spektrum problemów praktycznych wykorzystywanych w dalszych częściach rozprawy. Kolejne rozdziały prezentują główne przyczynki prac Doktoranta. Rozdział 5 opisuje proponowany wariant algorytmu ewolucyjnego (EASG) przystosowany do efektywnego przeszukiwania przestrzeni strategii gier Stackelberga, koncentrując się (ze zrozumiałych przyczyn) na reprezentacji rozwiązań i operatorach przeszukiwania. Rozdział 6 to obszerna (ponad 30 stron) prezentacja wyników zakrojonych na szeroką skalę eksperymentów obliczeniowych, w których Autor konfrontuje EASG z referencyjnymi algorytmami dokładnymi i przybliżonymi na pięciu różnych grach i wielu instancjach tych problemów. Rozdział 7 ma także charakter eksperymentalny i zawiera analizę wpływu (wrażliwości) EASG na ustawienia poszczególnych parametrów, zbieżność algorytmu do rozwiązań optymalnych, oraz 'analizę behawioralną' EASG, w tym ocenę dynamiki algorytmu. W Rozdziale 8 Autor przeprowadza dyskusję EASG w kategoriach ograniczonej racjonalności i prezentuje wariant podejścia adresujący to wyzwanie. Rozdział 9 uogólnia EASG do wariantu koewolucyjnego. Całość przyczynków rozprawy podsumowana została w Rozdziale 10, który zawiera także krytyczną analizę proponowanych podejść i dyskusję dalszych możliwych kierunków badań.

### 2.2 Wkład oryginalny

Główne przyczynki rozprawy odpowiadają motywom przewodnim rozdziałów 5-9. Są to w mojej ocenie:

1. Zaproponowanie rodziny algorytmów ewolucyjnych EASG przeznaczonych do znajdowania równowagi Stackelberga (Rozdział 5). Proponowany sposób reprezentacji rozwiązań (w szczególności strategii mieszanej jako rozkładu prawdopodobieństwa po strategiach prostych) i operatorów przeszukiwania jest moim zdaniem naturalny i, jak pokazują prezentowane dalej w pracy wyniki eksperymentów obliczeniowych, przekłada się na

wysoką skuteczność tego podejścia na szerokiej gamie wariantów gier obronnych Stackelberga. Zaznaczmy że według rozeznania Autora proponowane podejście stanowi pionierską w skali światowej próbę wykorzystania podejść ewolucyjnych do tej klasy problemów, co moja pobieżna analiza literatury wydaje się potwierdzać.

2. Bardzo gruntowne i staranne empiryczne porównanie skuteczności algorytmu EASG z zarówno algorytmami dokładnymi jak i innymi algorytmami heurystycznymi/przybliżonym (Rozdział 6). Porównania tego Doktorant dokonał na pięciu zróżnicowanych kategoriach gier, reprezentujących zarówno gry z dyskretną jak i ciągłą przestrzenią stanów, mianowicie Warehouse Games, Search games, Games on a Plane, oraz Signaling Games. Dla każdej kategorii gier algorytmy testowane były na wielu instancjach problemów (od kilkudziesięciu do kilku tysięcy instancji per problem). Doktorant dołożył starań aby instancje problemu były zdywersyfikowane, a w przypadku ich syntetycznego generowania zbliżone do realiów zastosowań praktycznych (np. różne kategorie grafów generowanych dla problemu Signaling Games). Metody niedeterministyczne uruchamiane były 30 razy na każdej instancji problemu, aby otrzymać wiarygodną wartość oczekiwaną metryk. W każdej z tych kategorii Autor był w stanie wykazać przewagę EASG nad konkurencyjnymi algorytmami, w sensie przynajmniej jednej z rozważanych metryk skuteczności, tj. średniej różnicy wartości funkcji wypłat względem rozwiązania optymalnego, maksymalnej różnicy wartości funkcji wypłat względem rozwiązania optymalnego, procentu instancji problemu dla których algorytm znalazł rozwiązanie optymalne, czasu obliczeń, oraz zajętości pamięci operacyjnej. Różnice na korzyść algorytmów Doktoranta są często bardzo znaczące, i zostały poddane analizie statystycznej, która w zdecydowanej większości przypadków potwierdziła istotność obserwowanych różnic. Przewaga zaproponowanego podejścia jest szczególnie istotna na kryteriach zasobowych: znaczne zapotrzebowanie metod referencyjnych (zwłaszcza tych dokładnych) na pamięć operacyjną i czas obliczeniowy czynią je często nieprzydatnymi w rozwiązywaniu większych instancji problemu, podczas gdy EASG charakteryzuje się dużo lepszą skalowalnością. Kolejnym argumentem na korzyść proponowanego podejścia jest uniwersalność zaproponowanych ustawień parametrów, które zapewniło wysoką skuteczność algorytmu na wszystkich rozważanych klasach problemów. Szczególnie w przypadku dwóch ostatnich z wymienionych wyżej gier stopień ich wyrafinowania oraz wierność modelowania świata rzeczywistego (np. wielofazowość w Signaling Games, obecność niepewności informacji, błędy wykrycia akcji przeciwnika) czynią je (a zatem także wyniki wypracowane przez Doktoranta w tym zakresie) potencjalnie przydatnymi w praktyce. Rozdział zawiera także inne przyczynki związane z EASG, w szczególności lokalną optymalizację rozwiązań.
3. Dogłębne przeanalizowanie 'charakterystyki behawioralnej' EASG oraz jego wariantów (Rozdział 7). Efektem tych prac jest wyznaczenie rekomendowanych wartości parametrów (m.in. wielkości populacji i prawdopodobieństw mutacji i krzyżowania), co ułatwia dostosowanie parametryzacji algorytmu do specyfiki zadania (jak sam Autor argumentuje na końcu sekcji 7.1). Rozdział zawiera także empiryczną analizę zbieżności i innych charakterystyk algorytmu, podpartą argumentami teoretycznymi. Prezentowane wyniki pozwalają na wyrobienie sobie pewnego pojęcia o charakterystyce rozwiązań produkowanych EASG, i wskazują również na pewne jego zalety, na przykład skłonność do

konstruowania strategii mieszanych składających się z niewielkiej liczby strategii prostych (sekcja 7.3.2).

4. Zaproponowanie rozszerzonego wariantu metody (EASG\_AT), uwzględniającego ograniczoną racjonalność Atakującego, oraz empiryczne porównanie jej z innymi podejściami, w tym z algorytmem NESG, w którym wypłata obrońcy estymowana jest przy pomocy wcześniej nauczonej sztucznej sieci neuronowej (Rozdział 8). Rozdział prezentuje kilka modeli ograniczonej racjonalności oraz wykorzystuje trzy z nich w części eksperymentalnej. Wyniki sugerują że metoda EASG\_AT przy znajomości modelu ograniczonej racjonalności Atakującego osiąga najlepsze wyniki, to jest maksymalizuje średnie wypłaty obrońcy bardziej skutecznie niż podstawowa metoda EASG, i jest także lepsza niż NESG. Z drugiej strony NESG osiąga całkiem wysoką skuteczność, biorąc pod uwagę fakt że nie jest ona informowana o przyjętym przez Atakującego modelu ograniczonej racjonalności. Przyczynek ten uważam za szczególnie interesujący, ponieważ wykorzystywany tutaj model uczenia maszynowego ma za zadanie niejako przewidzieć formę nieracjonalności Atakującego jedynie na podstawie strategii Obrońcy, co z jednej strony wydaje się nadzwyczaj trudne, a z drugiej może mieć interesujące implikacje praktyczne.
5. Propozycja koewolucyjnego wariantu podejścia (Rozdział 9). Rozszerzenie to umożliwia zawężenie podzbioru strategii rozważanych przez Atakującego w odpowiedzi na akcje Obrońcy, co potencjalnie otwiera drzwi do efektywnego znajdowania skutecznych strategii Obrońcy w grach z bardzo dużą lub nieskończoną liczbą strategii Atakującego. Doktorant zaproponował tu kompetytywny algorytm ewolucyjny, w którym strategie Obrońcy i Atakującego ewoluują w osobnych populacjach i są konfrontowane ze sobą w rozgrywkach. Proces ten moderowany jest przez dobrze przemyślaną, asymetryczną funkcję celu, której konstrukcja zapobiega możliwym "patologiom". Autor przeprowadził w tym rozdziale strojenie relewantnych parametrów metody, a następnie skonfrontował ją z metodą EASG i dwoma metodami referencyjnymi na znacznej kolekcji gier. Eksperymenty wykazały znakomitą skalowalność podejścia koewolucyjnego, co pozwala mu generować wysokiej jakości strategie Obrońcy w ramach nakładów obliczeniowych o rzędy wielkości niższych niż dla podejść referencyjnych, przy jednocześnie nieznacznym jedynie pogorszeniu jakości rozwiązań. Ta sama właściwość algorytmu koewolucyjnego pozwala także na rozwiązywanie instancji problemu o rozmiarach niedostępnych dla podejść referencyjnych.

## 2.3 Ocena zawartości pracy i uwagi polemiczne

Rozprawa (a wcześniej artykuły na których została oparta) prezentuje długą listę interesujących i nowych wyników, które wypracowane zostały w oparciu o dobrze przemyślany warsztat badawczy i rozpoznanie natury problemu, w tym słabości wcześniejszych metod. Proponowane warianty podejścia adresują dobrze znane i istotne wyzwania koncepcyjne i praktyczne (m.in. ograniczoną racjonalność przeciwnika i znaczną liczbę jego strategii). Wyniki empiryczne uzyskane zostały na bazie masywnych eksperymentów obliczeniowych, przeprowadzonych na zróżnicowanej gamie klas problemów i ich instancji, i poprzedzone zostały rzetelnym rozpoznanem właściwości metody i

strojeniem ich parametrów (spodziewam się że całkowita liczba uruchomień algorytmów szła w miliony). Co najważniejsze, eksperymenty wykazały zdecydowaną przewagę proponowanego podejścia zarówno nad metodami dokładnymi, jak i przybliżonymi, umożliwiając rozwiązywanie dużo większych instancji problemu w akceptowalnym czasie. W związku z powyższym, **moja ocena rozprawy jest zdecydowanie pozytywna**.

Z subiektywnej perspektywy, wśród zaprezentowanych przyczynków szczególnie doceniam: i) podjęte próby rozbudowy bazowego algorytmu o przeszukiwanie lokalne, ii) wykorzystanie wielu klas gier, iii) wykorzystanie mechanizmów adaptacyjnych celem zamodelowania nieznannej z góry formy nieracjonalności Atakującego, oraz iv) propozycję wariantu koewolucyjnego metody.

Pod względem redakcyjnym rozprawa została przygotowana bardzo starannie. Wprowadzenie teoretyczne jest zwarte i precyzyjne, z poprawną i klarowną formalizacją podpartą przystępnymi wyjaśnieniami w tekście. W całej pracy wywody ilustrowane są licznymi rysunkami i przykładami, co wydatnie ułatwia zrozumienie treści rozprawy.

W trakcie lektury pracy dopatrzyłem się jedynie kilku drobnych niedociągnięć redakcyjnych. W algorytmie 2.1 (str. 18) linie od 5 do 8 włącznie powinny być głębiej wcięte, to jest stanowić część ciała wyżej umieszczonej pętli while. Fraza "kolejne pokolenia populacji" (str. 40) brzmi dziwnie i redundantnie; lepiej brzmiałoby "kolejne pokolenia" lub "kolejne populacje". Na rysunku 2.5 (str. 41) testowanie warunku stopu musi być poprzedzone ewaluacją rozwiązań, ponieważ bazuje na przypisanych im wartościach funkcji oceny. Jeżeli algorytmy przedstawione przez doktoranta w sekcji 4.2 są istotnie metodami przybliżonymi w ścisłym tego słowa znaczeniu (*approximate*), a nie jedynie heurystycznymi, to przydałoby się podać ich gwarancje aproksymacyjne, jeśli są znane. Na stronie 66 (i kilkakrotnie w dalszej części pracy) podany jest limit pamięci 128GB podczas gdy na stronie 50 mowa jest o komputerze z 256 GB pamięci RAM; prawdopodobnie lepiej byłoby zapowiedzieć limit pamięci już na stronie 50.

Zdanie "*Presja selekcji mniejsza niż 0.5 ( $p_s < 0.5$ ) oznaczałaby większą szansę na promocję (zwycięstwo w turnieju) osobników o mniejszej wartości funkcji przystosowania, co naturalnie nie jest pożądaną własnością algorytmu ewolucyjnego*" (ostatni akapit na str. 85) nie jest zgodne z prawdą. Z analizy Algorytmu 2.1 (po jego skorygowaniu w sposób wspomniany przeze mnie wyżej) wynika, że dowolna większa od zera wartość parametru  $p_s$  powoduje że selekcja nie jest zupełnie losowa, to jest ma (lekką) tendencję do preferowania lepszych rozwiązań. Nie do końca zgadzam się też z dalszą częścią tego akapitu, gdzie autor wydaje się argumentować że  $p_s=1$  powoduje drastyczną redukcję różnorodności w populacji. Zwróćmy uwagę że selekcja turniejowa, zwłaszcza o niewielkim rozmiarze turnieju (zakładam za sekcją 5.9 że w całej pracy wykorzystywana jest turniej o rozmiarze 2, tj. binarna selekcja turniejowa), charakteryzuje się niezerowym prawdopodobieństwem akceptowania globalnie słabszych osobników z racji ograniczonego rozmiaru turnieju, tj. słabe rozwiązanie ma nadal szansę bycia wybranym gdy trafi do turnieju z jeszcze słabszymi konkurentami; fundamentalnie niemożliwe jest jedynie wybranie osobnika najgorszego w populacji.

[W nawiązaniu do tego przyznam że nie jestem zwolennikiem parametrycznej wersji selekcji turniejowej, która zakłada dodatkowy parametr presji selekcyjnej  $p_s$ . Używanie parametrycznej selekcji turniejowej zwiększa liczbę parametrów algorytmu, co utrudnia jego strojenie. Moim zdaniem naturalnym sposobem kontrolowania intensywności presji selekcyjnej jest dobór samego rozmiaru turnieju: Im mniejszy turniej, tym presja selekcyjna jest słabsza. W praktyce oznacza to iż selekcja turniejowa o rozmiarze 2 (bez explicite presji selekcyjnej) wywiera najslabszą możliwą presję. Wprowadzając zabieg presji selekcyjnej w postaci parametru  $p_s$ , autor osłabia ją jeszcze bardziej. Domniemuję że taki był właśnie zamiar Doktoranta. Potwierdzają to w pewnym stopniu wyniki strojenia parametrów prezentowane w sekcji 7.1, a w szczególności Rys. 7.3(a).]

W prezentacji poszerzonych wariantów algorytmu w sekcji 7.4, bardzo istotna uwaga o ocenie modyfikowanych osobników została umieszczona w stopce. Zaskakuje też nieco że prezentacja tych wariantów metody nie nawiązuje do algorytmów memetycznych (sekcja 2.3.8), a przecież część z prezentowanych tu rozszerzeń to oczywiste instancje lokalnej optymalizacji.

Umieszczenie rozdziału 7 poświęconego optymalizacji parametrów EASG po rozdziale 6, prezentującym wyniki na tle podejść kontrolnych, jest nieco zaskakujące. Bardziej logiczne byłoby najpierw zaprezentowanie wyznaczania rekomendowanych wartości parametrów, a dopiero następnie przetestowanie podejścia "w warunkach bojowych". Jest to tym bardziej zaskakujące, że Tabela 6.1 wykorzystuje wszystkie rekomendacje uzyskane w rozdziale 7. Domniemuję że taki porządek rozdziałów wynikał z chęci wcześniejszego zaprezentowania rozważanych klas gier.

Można mieć drobne wątpliwości co do niektórych terminów wykorzystywanych w pracy. Na przykład dla angielskiego terminu *tuple* mamy naturalny polski odpowiednik *krotka*, podczas gdy autor ucieka się do kalki językowej w postaci słowa *tupla* (str. 9). Dalej, w moim doświadczeniu kryterium optymalizowane w problemie cyklu Hamiltona nazywamy najczęściej kosztem, a nie wagą (str. 14). Gdzie to możliwe, rekomendowałbym także unikanie terminologii ewolucyjnej zapożyczonej z biologii (np. chromosom, osobnik) – mamy dla tych terminów dobrze ugruntowane i jednoznaczne określenia (tu: rozwiązanie), a mnożenie synonimów niekoniecznie polepsza czytelność tekstu.

Wymienione wyżej uwagi polemiczne mają stanowić przydatną informację zwrotną, i nie wpływają na moją ogólnie pozytywną ocenę przedłożonej rozprawy.

### 3. Konkluzja końcowa

Rozprawa doktorska mgr inż. Adama Żychowskiego zawiera szereg oryginalnych osiągnięć i wyników, unikalnych w skali globalnej i dotyczących aktualnych tematów badawczych o znaczącym przełożeniu praktycznym. Uważam że hipoteza postawiona przez Autora pracy została zdecydowanie potwierdzona.

Wobec powyższego stwierdzam, że **rozprawa doktorska mgr inż. Adama Żychowskiego spełnia z solidną nawiązką warunki stawiane przez ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych w odniesieniu do rozpraw doktorskich, a zatem powinna być dopuszczona do publicznej obrony, o co wnoszę do Rady Dyscypliny Naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej.**

Ponadto, biorąc pod uwagę jakość, ilość i różnorodność zaprezentowanych w pracy wyników, oraz powiązane z nimi publikacje Doktoranta, które ukazały się w najwyższej rangowanych periodykach i konferencjach, **zdecydowanie wnoszę o wyróżnienie rozprawy.**

Handwritten signature in black ink, appearing to read "Wiesław Urban".