

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY
INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

zaprasza na
OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
mgr. inż. Konrada Krawczyka

która odbędzie się w dniu **16 kwietnia 2026 roku**, o godzinie **12:15** w trybie stacjonarnym

Temat rozprawy:

“Analiza i zastosowanie modeli zastępczych do poprawy efektywności algorytmu JADE”

Promotor: prof. dr hab. inż. Jarosław Arabas – Politechnika Warszawska

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Grzegorz Dudek – Politechnika Częstochowska

dr hab. inż. Szymon Łukasik, prof. uczelni – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

dr hab. inż. Krzysztof Trojanowski – Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie

Obrona odbędzie się stacjonarnie w Audytorium Centralnym Wydziału Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej w Warszawie.

Z rozprawą doktorską i recenzjami można zapoznać się w Czytelnicy Biblioteki Głównej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Plac Politechniki 1.

Streszczenie rozprawy doktorskiej i recenzje są zamieszczone na stronie internetowej: <https://www.bip.pw.edu.pl/Postepowania-w-sprawie-nadania-stopnia-naukowego/Doktoraty/Wszczete-po-30-kwietnia-2019-r/Rada-Naukowa-Dyscypliny-Informatyka-Techniczna-i-Telekomunikacja/mgr-inz.-Konrad-Krawczyk>

Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja
Politechniki Warszawskiej
prof. dr hab. inż. Jarosław Arabas

Analiza i zastosowanie modeli zastępczych do poprawy efektywności algorytmu JADE.

Rozprawa dotyczy obszaru optymalizacji z kosztowną funkcją celu i przedstawia cykl badawczy skoncentrowany na rozwoju i analizie algorytmów ewolucyjnych wspomaganych modelami zastępczymi. Głównym celem pracy było opracowanie nowej, wydajniejszej wersji jednego z najskuteczniejszych algorytmów optymalizacji ciągłej – JADE, poprzez jego integrację z modelami zastępczymi.

Punktem wyjścia dla badań była hipoteza o możliwości wykorzystania w algorytmie JADE, pierwotnie przygotowanej dla algorytmu CMA-ES, procedury zarządzania procesem budowy modelu zastępczego. Inspirację stanowiło fundamentalne podobieństwo obu algorytmów, polegające na wykorzystaniu informacji o rankingu najlepszych punktów w populacji. W ramach pierwszego etapu badań opracowano i zaimplementowano metodę, której skuteczność została potwierdzona z użyciem modelu regresyjnego opartego na metodzie k najbliższych sąsiadów (kNN). Następnie przeprowadzono systematyczne badania porównawcze, w których model kNN, mimo swojej prostoty, okazał się skuteczniejszy od bardziej złożonych modeli regresyjnych, takich jak lasy losowe, XGBoost czy maszyny wektorów nośnych.

Obserwacja ta doprowadziła do kluczowego etapu pracy, w którym zbadano relację między dokładnością predykcji modelu, a jego wpływem na efektywność algorytmu JADE. Na podstawie eksperymentów stwierdzono, że dla skuteczności algorytmu JADE ważniejsza od bezwzględnej dokładności predykcji (mierzonej błędem RMSE) jest zdolność modelu do zachowania prawidłowej kolejności rozwiązań (mierzona współczynnikiem korelacji rang Spearmana).

W ostatnim etapie pracy, w odpowiedzi na zaobserwowaną istotność roli rankingu, zaproponowano zmianę modelu zastępczego z regresyjnego na klasyfikacyjny. Opracowano i zweryfikowano trzy modele klasyfikacyjne, których zadaniem była predykcja względnej jakości rozwiązań. Jeden z rozważanych modeli, nazwany CACS, okazał się rozwiązaniem najskuteczniejszym, gdyż jego użycie poprawia efektywność algorytmu JADE w większym stopniu niż rozwijane wcześniej modele regresyjne.

Integralną częścią cyklu pracy było również przeprowadzenie analizy literatury przedmiotu, która zakończyła się publikacją przeglądową. Dokonano krytycznego przeglądu aktualnego stanu wiedzy w dziedzinie modeli zastępczych dla problemów jednokryterialnych. W ramach tej syntezy zaproponowano także ramy koncepcyjne, które mogą służyć jako praktyczny przewodnik dla badaczy przy projektowaniu i implementacji nowych rozwiązań integracji modeli zastępczych i algorytmów ewolucyjnych.

Słowa kluczowe: metaheurystyki, algorytmy ewolucyjne, modele zastępcze, optymalizacja, obliczenia ewolucyjne

Prof. dr hab. inż. Grzegorz Dudek
Katedra Automatyki, Elektrotechniki i Optoelektroniki
Wydział Elektryczny
Politechnika Częstochowska
Al. Armii Krajowej 17
42-200 Częstochowa

Częstochowa, dn. 5 stycznia 2026 r.

Rada Naukowa Dyscypliny
INFORMATYKA TECHNICZNA
I TELEKOMUNIKACJA

Sekretariat
Data wpływu... 12.01.26r.
Numer.....

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Konrada Krawczyka
pt. *Analiza i zastosowanie modeli zastępczych do poprawy efektywności*
algorytmu JADE

Formalną podstawą opracowania recenzji jest uchwała nr 96/2025 Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej z dnia 21 października 2025 r. Oceny rozprawy doktorskiej dokonano według kryteriów określonych w ustawie z 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*. Promotorem rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Jarosław Arabas.

Charakterystyka rozprawy

Rozprawę doktorską stanowi zbiór sześciu powiązanych tematycznie artykułów naukowych opatrzonych częścią wstępną. Część wstępna zawiera streszczenia w języku polskim i angielskim, wprowadzenie opisujące kontekst naukowy, problematykę i cel badań, a także wkład doktoranta, przegląd literatury, opis poszczególnych artykułów, podsumowanie ze wskazaniem kierunków dalszych badań oraz bibliografię (36 pozycji). Część wstępna liczy 37 stron.

Zbiór artykułów wchodzących w skład rozprawy:

- [1] Konrad Krawczyk, Jarosław Arabas. JADE with k Nearest Neighbors Surrogate Model, Proceedings of the Companion Conference on Genetic and Evolutionary Computation (GECCO'23 Companion), 2023, Association for Computing Machinery.
- [2] Konrad Krawczyk, Jarosław Arabas. Comparison of Different Surrogate Models for the JADE Algorithm, Proceedings of the 15th International Joint Conference on Computational Intelligence (ECTA), 2023, SciTePress.
- [3] Konrad Krawczyk, Jarosław Arabas. Empirical Study of Surrogate Model Assisting JADE: Relation Between the Model Accuracy and the Optimization Efficiency, Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion (GECCO'24 Companion), 2024, Association for Computing Machinery.
- [4] Konrad Krawczyk, Jarosław Arabas. What Is the Impact of Typical Surrogate Models on the Performance of the JADE Algorithm?, In: Bäck, T., et al. Computational Intelligence. IJCCI 2023. Studies in Computational Intelligence, vol 1196. Springer, Cham.
- [5] Konrad Krawczyk, Jarosław Arabas. From 'How Good?' to 'Is it Better?': Classification-Based Surrogate Models for JADE, Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion (GECCO'25 Companion), 2025, Association for Computing Machinery.

- [6] Konrad Krawczyk, Jarosław Arabas. Single-Objective Surrogate Models for Continuous Metaheuristics: An Overview, Applied Sciences, vol. 15, no. 16, article 9068, 2025, MDPI.

Tematyka rozprawy i problem badawczy

Rozprawa koncentruje się na opracowaniu i analizie modeli zastępczych (*surrogate models*) wspierających algorytm JADE – jeden z najskuteczniejszych wariantów ewolucji różnicowej stosowanych w optymalizacji ciągłej. Głównym celem pracy było zwiększenie efektywności algorytmu JADE poprzez integrację z modelami zastępczymi, co pozwoliło na redukcję liczby ewaluacji kosztownej funkcji celu. Autor przebadął różne typy regresyjnych modeli zastępczych (kNN, Random Forest, XGBoost, SVR), a następnie zaproponował zmianę paradygmatu na modele klasyfikacyjne (BCCS, ATCS, CACS), dowodząc, że dla efektywności optymalizacji ważniejsze od dokładności predykcji funkcji przystosowania jest zachowanie prawidłowego rankingu rozwiązań.

Tematyka rozprawy jest istotna i aktualna z kilku kluczowych powodów. Po pierwsze, współczesne problemy optymalizacyjne w wielu rzeczywistych zastosowaniach inżynierskich i naukowych wymagają wielogodzinnych lub nawet wielodniowych obliczeń dla pojedynczej ewaluacji funkcji celu, co czyni bezpośrednie zastosowanie standardowych metaheurystyk (z dokładną estymacją funkcji celu) niepraktycznym. Po drugie, mimo dynamicznego rozwoju algorytmów ewolucyjnych wspomaganych modelami zastępczymi (*Surrogate-Assisted Evolutionary Algorithms*, SAEA), wciąż istnieje luka badawcza w zrozumieniu relacji między dokładnością modelu zastępczego a efektywnością optymalizacji. Praca empirycznie wykazuje, że dla algorytmu JADE ważniejsza od bezwzględnej dokładności predykcji jest zdolność modelu do zachowania prawidłowego rankingu rozwiązań, co prowadzi do przełamania paradygmatu stosowania wyłącznie modeli regresyjnych jako modeli zastępczych. Wreszcie, rosnące wymagania wobec optymalizacji kosztownych obliczeniowo problemów przy ograniczonym budżecie obliczeniowym sprawiają, że rozwój wydajnych metod SAEA ma bezpośrednie przełożenie praktyczne, a zaproponowane w pracy modele klasyfikacyjne (szczególnie CACS) mogą wykazywać przewagę nad dotychczasowymi rozwiązaniami regresyjnymi. Warto więc kontynuować ten kierunek badań.

Tytuł rozprawy jest odpowiednio zwarty i komunikatywny. W pełni oddaje treść rozprawy. Problem badawczy jest jasno i poprawnie sformułowany w rozdz. 1.2:

1. Opracowanie i weryfikacja metody integracji algorytmu JADE z globalnym modelem zastępczym.
2. Porównanie efektywności różnych typów regresyjnych modeli zastępczych w ramach opracowanej metody.
3. Zbadanie i wyjaśnienie fundamentalnej relacji między dokładnością predykcji modelu, a jego wpływem na zbieżność algorytmu optymalizacyjnego.
4. Zaproponowanie, implementacja i weryfikacja podejścia opartego na modelach klasyfikacyjnych jako alternatywy dla standardowych modeli regresyjnych.

Cześć wstępna rozprawy

Rozdział pierwszy spełnia swoją podstawową rolę, wprowadzając czytelnika w problematykę pracy i uzasadniając podjęcie badań. Temat został osadzony w odpowiednim kontekście naukowym, a motywacja autora jest czytelna. Na plus należy zaliczyć także jasne sformułowanie celu pracy i zakresu

rozprawy oraz szczegółowe omówienie wkładu doktoranta w każdą z sześciu publikacji (istotne dla oceny samodzielności pracy badawczej). Rozdział mógłby jednak zyskać na wyraźniejszym wskazaniu luki badawczej i oryginalnego wkładu autora.

Rozdział drugi stanowi kompleksową i systematyczną syntezę aktualnego stanu wiedzy w dziedzinie algorytmów ewolucyjnych wspomaganych modelami zastępczymi. Jego treść została opracowana na podstawie artykułu przeglądowego [6], który omawiam w dalszej części recenzji. Autor wykazuje dobrą orientację w literaturze, obejmując zarówno klasyczne, jak i nowsze prace, istotne z punktu widzenia tematyki rozprawy. Przegląd ma logiczną strukturę i pozwala zrozumieć ewolucję omawianych metod oraz podejść badawczych. Na szczególne uznanie zasługuje umiejętność krytycznego odniesienia się do wybranych rozwiązań.

W rozdziale trzecim autor omawia zbiór artykułów [1-5], przedstawiając proces ewolucji koncepcji badawczej oraz uzyskane rezultaty. Rozpoczyna od przedstawienia i weryfikacji metody integracji algorytmu JADE z globalnym regresyjnym modelem zastępczym opartym na algorytmie k najbliższych sąsiadów (kNN). W dalszej części skupia się na systematycznym porównaniu efektywności różnych typów regresyjnych modeli zastępczych, takich jak kNN, lasy losowe czy XGBoost, w ramach zaproponowanej architektury. Wartościowym poznawczo elementem tego rozdziału jest analiza relacji między dokładnością predykcji modelu zastępczego a rzeczywistą zbieżnością algorytmu, która doprowadziła do odkrycia, że dla efektywności JADE ważniejsze od precyzji modelowania jest zachowanie prawidłowego rankingu rozwiązań. Zwieńczeniem cyklu badawczego opisanego w tym rozdziale jest propozycja i weryfikacja autorskiego podejścia opartego na modelach klasyfikacyjnych, które okazało się skuteczną alternatywą dla tradycyjnych rozwiązań regresyjnych. Całość rozdziału jest spójnym zapisem drogi od prostej integracji modeli zastępczych, poprzez próbę zrozumienia mechanizmów ich wpływu na algorytm ewolucyjny, aż po opracowanie dedykowanych rozwiązań klasyfikacyjnych optymalizujących działanie JADE.

W podsumowaniu (rozdział 4) autor zbiera najważniejsze rezultaty przeprowadzonych badań, odnosząc je do postawionych celów i problemów badawczych. Poprawnie porządkuje wnioski płynące z badań, podkreślając zarówno uzyskane osiągnięcia, jak i ich znaczenie poznawcze oraz aplikacyjne. Trafnie identyfikuje główne obserwacje i implikacje wyników, a także sygnalizuje możliwe kierunki dalszych badań, co świadczy o dojrzałym podejściu badawczym. Podsumowanie jest spójne z treścią całej rozprawy i stanowi jej właściwe, merytoryczne domknięcie.

Zbiór artykułów

Artykuł [1] przedstawia propozycję wzbogacenia algorytmu JADE – jednej z najbardziej efektywnych odmian algorytmu ewolucji różnicowej – o globalny model zastępczy oparty na metodzie kNN. Autorzy adaptują ideę procedury rankingowej znanej wcześniej z modyfikacji CMA-ES i integrują ją z mechanizmem JADE, co stanowi istotny wkład metodologiczny. Opis proponowanej adaptacji JADE jest klarowny, wzbogacony pseudokodami (Algorytmy 1 i 2).

Artykuł stanowi wartościowy i oryginalny wkład w dziedzinę optymalizacji ewolucyjnej, prezentując udaną integrację mechanizmu JADE z modelem zastępczym kNN. Przedstawione wyniki wskazują, że metoda może poprawić wydajność optymalizacji w stosunku do standardowej wersji algorytmu JADE w warunkach ograniczonego budżetu obliczeń. Trzeba jednak podkreślić, że wyniki nie są jednoznaczne – w wielu przypadkach algorytm zmodyfikowany przynosi gorsze rezultaty od standardowego (ok. 18-21% przypadków).

Przy analizie rezultatów nasuwa się pytanie, dlaczego nie porównano wyników z osiągnięciami CMA-ES, z którego zaczerpnięto pomysł procedury rankingowej. Takie porównanie zwiększyłoby wartość poznawczą artykułu, pozwalając ocenić, czy adaptacja procedury rankingowej i modelu zastępczego do JADE rzeczywiście daje przewagę nad jej oryginalnym zastosowaniem w CMA-ES. Bez porównania z konkurencyjnymi algorytmami ocena znaczenia proponowanej modyfikacji oraz jej rzeczywistego wkładu w rozwój metod optymalizacji z wykorzystaniem modeli zastępczych jest trudna.

W artykule zabrakło dyskusji parametrów modelu i ich wpływu na wyniki. Autorzy prezentują wyniki dla algorytmu z różnym rozmiarem archiwum S , pomijając inne parametry mające wpływ na wyniki optymalizacji. W badaniach eksperymentalnych przyjęto model zastępczy z liczbą sąsiadów ustaloną arbitralnie jako $k = D+2$, gdzie D jest liczba wymiarów. Parametr k decyduje o stopniu wygładzenia funkcji zastępczej i może mieć istotny wpływ na wyniki optymalizacji. Tej kwestii nie podjęto w artykule.

Artykuł [2] opisuje rozszerzone badania w stosunku do pracy [1], analizując jako modele zastępcze cztery popularne modele regresyjne: kNN, Random Forest, XGBoost oraz Support Vector Regression (SVR). W części eksperymentalnej porównano JADE z różnymi modelami zastępczymi na dwudziestu ośmiu 10-wymiarowych funkcjach testowych z benchmarku CEC2013.

Wprowadzenie dobrze uzasadnia potrzebę wykorzystania modeli zastępczych w kontekście kosztownych obliczeniowo funkcji celu i przedstawia problemy związane z doбором modeli zastępczych. Opis proponowanej adaptacji JADE jest wystarczająco dokładny i zrozumiały, jednak modele zastępcze opisane są bardzo oszczędnie – szczególnie te bardziej złożone jak XGBoost i SVR.

W części eksperymentalnej zaprezentowano wyniki zmodyfikowanego algorytmu JADE dla wielu rozmiarów archiwów z wykorzystaniem różnych modeli zastępczych. Wszystkie parametry JADE oprócz rozmiaru archiwum przyjęto jako stałe. Jako stałe pozostawiono również hiperparametry modeli regresyjnych stosowanych jako modele zastępcze. Budzi to pewne wątpliwości, ponieważ trudno oczekiwać, aby domyślne ustawienia hiperparametrów były optymalne w kontekście modelowania złożonych funkcji testowych z zestawu CEC2013 – funkcji celowo konstruowanych tak, aby były one „trudne”: silnie nieliniowe, wielomodalne, łączące obszary płaskie z głębokimi „dołkami” i „rowkami”. Można zatem spodziewać się, że modele regresyjne będą z góry skazane na nieoptymalne działanie i nie będą spełniały swojej funkcji jako modele zastępcze. Może to tłumaczyć wyjątkowo słabe wyniki JADE z SVR, który w większości przypadków był gorszy od standardowego JADE.

Ograniczenie to – tj. stosowanie stałych, potencjalnie nieoptymalnych parametrów JADE oraz hiperparametrów modeli regresyjnych – stanowi istotny element metodologiczny, który należy mieć na uwadze przy interpretacji wyników. Z drugiej jednak strony trudno oczekiwać pełnego przeszukania tak ogromnej przestrzeni parametrów/hyperparametrów, zwłaszcza że zarówno JADE, jak i większość modeli regresyjnych (z wyjątkiem deterministycznego kNN) mają charakter stochastyczny, co dodatkowo zwiększa koszty obliczeniowe eksperymentów. Z tego punktu widzenia przyjęte uproszczenie może być zrozumiałe i praktycznie uzasadnione, choć z pewnością ogranicza możliwość wyciągania jednoznacznych wniosków o przewadze jednych modeli nad innymi. Szkoda, że w artykule zabrakło dyskusji tego problemu.

Artykuł [4] powiela treść, strukturę i wyniki zaprezentowane wcześniej w publikacji [2]. Podstawowa metodologia – integracja JADE z procedurą rankingową oraz porównanie modeli zastępczych kNN, RFR, XGBoost i SVR – jest w [4] niemal identyczna jak w [2], co obejmuje również opisy algorytmów,

prezentację wyników za pomocą wykresów pudełkowych oraz analizę statystyczną opartą na teście Wilcoxon. Z tego względu artykuł nie stanowi samodzielnego wkładu naukowego. Nowością w [4] jest rozszerzenie analizy na problem 30-wymiarowy, która pozwala autorom wyciągnąć wniosek o stabilności przewagi kNN również w wyższych wymiarach. To rozszerzenie stanowi jedyny istotniejszy element różniący [4] od [2].

Artykuł [3] opisuje kolejny etap badań nad łączeniem algorytmu JADE z modelami zastępczymi – wnosi nowy aspekt badawczy: analizę relacji między dokładnością modelu zastępczego oraz jakością rankingu osobników a efektywnością optymalizacji. Autorzy skupiają się na empirycznym badaniu błędu RMSE i korelacji rang Spearmana (używanej do mierzenia jakości rankingu tworzonego przez modele zastępcze) i ich związku z krzywymi zbieżności populacji.

Najważniejszym wkładem artykułu [3] jest wykazanie, że większa dokładność modelu nie gwarantuje lepszej optymalizacji, a kluczowe znaczenie ma utrzymanie poprawnej struktury rang populacji, szczególnie ważnej w fazie mutacji i selekcji. Jest to istotne uzupełnienie wcześniejszych prac [1-3], które empirycznie pokazywały wyższość kNN, ale nie wyjaśniały, dlaczego model o większym błędzie modelowania funkcji przystosowania działa lepiej niż bardziej złożone metody (RFR, XGBoost). Artykuł [3] po raz pierwszy formułuje spójne wyjaśnienie tego zjawiska – na przykładzie wyników z CEC2013 pokazano, że kNN mimo większych błędów osiąga wysoką korelację rang, a to właśnie ta własność napędza skuteczność optymalizacji z modelem rankingowym.

Artykuł [5] wnosi nowy wkład w stosunku do wcześniejszych prac: odejście od modeli regresji jako modeli zastępczych na rzecz modeli klasyfikacyjnych, które przewidują relatywną jakość rozwiązań zamiast ich wartości przystosowania. Tym samym artykuł [5] przesuwając akcent z pytania „jak dokładnie jest modelowanie funkcji przystosowania?” na „czy to rozwiązanie jest lepsze niż inne?”, co stanowi logiczne rozwinięcie obserwacji z [4], gdzie pokazano, że poprawny ranking ma w JADE większe znaczenie niż dokładność predykcji.

Praca [5] proponuje trzy pomysłowe warianty modeli klasyfikacyjnych opierające się na metodzie kNN – Binary Comparative Classification Surrogate (BCCS), Adaptive Threshold Classification Surrogate (ATCS) i Context-Aware Classification Surrogate (CACS). Każdy z tych wariantów wprowadza unikalne mechanizmy klasyfikacji rozwiązań i integracji z algorytmem JADE. BCCS sprowadza problem do prostej klasyfikacji binarnej, porównując pary rozwiązań (kandydatów na potomków oraz rodzica z potomkiem) i wybierając bardziej obiecujące rozwiązania, co pozwala filtrować słabe rozwiązania przed kosztowną ewaluacją. ATCS dodaje mechanizmy adaptacyjne, w tym dynamiczny próg ufności, mechanizm adaptacyjnej eksploracji i strategię zarządzania archiwum, dzięki czemu lepiej balansuje między eksploatacją a eksploracją przestrzeni rozwiązań. CACS idzie najdalej, wprowadzając trójklasowe etykietowanie i ocenę jakości rozwiązania w kontekście całej populacji, co pozwala modelowi odróżniać nie tylko poprawę, ale także jej „siłę”. Ponadto, zaimplementowano mechanizm adaptacyjnego wykorzystania modelu zastępczego zależnie od jego historycznej skuteczności.

Wyniki eksperymentalne przedstawione w artykule [5] wskazują, że CACS przewyższa klasyczny JADE, zwłaszcza dla złożonych funkcji multimodalnych i kompozycyjnych z zestawu CEC2013. Autorzy podkreślają, że modele klasyfikacyjne wymagają znacznie mniejszych archiwów niż modele regresyjne, co przekłada się na niższe koszty obliczeniowe.

Do wad artykułu zaliczam bardzo oszczędną formę prezentacji wyników. Autorzy przedstawili jedynie wykresy zbieżności dla wybranych funkcji testowych, pomijając liczbowe miary dokładności, szybkości

zbieżności oraz wyniki testów statystycznych. Ponadto zabrakło bezpośredniego porównania z wersjami JADE wykorzystującymi modele regresyjne, które analizowano w pracach [1–4]; takie porównanie znacząco zwiększyłoby wartość poznawczą i umożliwiło pełniejszą ocenę przewagi modeli klasyfikacyjnych nad regresyjnymi. W części teoretycznej pracy nie przedstawiono szczegółów implementacji kluczowego algorytmu kNN w żadnym z trzech podejść.

Artykuł [6] przedstawia szeroki i dobrze uporządkowany przegląd modeli zastępczych stosowanych w metaheurystykach dla kosztownych obliczeniowo problemów optymalizacji ciągłej. Publikacja wyróżnia się klarowną strukturą oraz kompletnością. Autorzy szczegółowo omawiają typy modeli (w podziale na regresyjne, klasyfikacyjne i rankingowe), właściwości interpolacyjne i ekstrapolacyjne modeli, struktury modeli (globalne, lokalne, hybrydowe, hierarchiczne) oraz strategie użycia i uczenia modeli. Takie uporządkowanie problemu może służyć jako praktyczne ramy koncepcyjne (*decision framework*), które w ustrukturyzowany sposób prowadzą badacza lub inżyniera przez proces projektowania systemu SAEA. Artykuł zawiera również bogatą, aktualną bibliografię (ponad 130 pozycji, co wskazuje na dobre rozeznanie w najnowszych trendach) oraz trafne omówienie wyzwań i kierunków przyszłych badań, takich jak skalowalność metod, problem ekstrapolacji, adaptacyjność modeli i rola niepewności predykcji.

Dodatkowe uwagi:

- 1) W przedłożonych pracach zwraca uwagę nieprecyzyjny zapis algorytmów za pomocą pseudokodów i brak objaśnień niektórych symboli tam użytych. Na przykład w czwartej linii Algorytmu 2 [1] (algorytm ten w analogicznej formie występuje również w pracach [2-4]) nie jest jasne, że osobniki x_i pochodzą z populacji P i są uszeregowane względem przystosowania. Podobne wątpliwości pojawiają się w linii 12 (ponadto tutaj prawdopodobnie błędnie użyto „ x ” jako symbolu iteratora zamiast „ i ”, tak jak zrobiono to poprawnie w linii 4). Funkcja `build_surrogate_model()` mogłaby zostać bliżej objaśniona w [1] – nie wiadomo czy implementuje ona ważoną wersję kNN, tak jak w artykule [2].
W linii 14 Algorytmu 1 [1] włącza się nowego osobnika do populacji O , ale w analogicznych algorytmach zawartych w [2-4] pominięto tę linię.
Pewne parametry w algorytmach są nieustalone, np.: c , $p\%$, m_i i n_b .
- 2) Brak analizy złożoności obliczeniowej proponowanych algorytmów i porównanie jej ze złożonością algorytmów standardowych. Jakie są dodatkowe koszty obliczeniowe związane z zastosowaniem różnych typów modeli zastępczych? Jak wypadają algorytmy klasyfikacyjne w porównaniu do regresyjnych?
- 3) W proponowanych rozwiązaniach rozmiar archiwum zmienia się w procesie ewolucyjnym, startując od niewielkiej liczby punktów. W takiej sytuacji model zastępczy narażony jest na przeuczenie (szczególnie w problemach wysokowymiarowych) i tym samym błędną estymację przystosowania nowych punktów. Proszę przedyskutować tę kwestię w kontekście różnych typów modeli zastępczych.
- 4) Rys. 7, 12 i 17 w [4] pokazują bardzo niskie błędy modeli zastępczych (ale nie wszystkich) przy starcie algorytmu. Proszę to wyjaśnić.
- 5) Brak opisu osi y na wykresach pudełkowych w [2] i [4].

Podsumowanie

Układ redakcyjny zarówno części wstępnej rozprawy jak i poszczególnych artykułów jest przejrzysty i zgodny z przyjętymi standardami prac naukowych, a wyodrębnienie rozdziałów i podrozdziałów sprzyja

czytelności oraz logicznemu odbiorowi całości. Język rozprawy jest poprawny, precyzyjny i utrzymany w stylu naukowym, przy czym terminologia została użyta konsekwentnie i adekwatnie do omawianej tematyki. Sekwencja treści jest logiczna i spójna, a kolejne rozdziały naturalnie wynikają z poprzednich, prowadząc czytelnika od wprowadzenia teoretycznego przez część badawczą do wniosków końcowych. Dobór źródeł literaturowych należy ocenić pozytywnie, gdyż obejmuje zarówno pozycje klasyczne, jak i aktualne publikacje, bezpośrednio związane z problematyką pracy, co świadczy o dobrej orientacji autora w stanie badań.

Trzy spośród sześciu zgłoszonych prac zostały opublikowane w materiałach pokonferencyjnych GECCO Companion. Konferencja GECCO należy do najbardziej prestiżowych i rozpoznawalnych konferencji na świecie w obszarze algorytmów ewolucyjnych i obliczeń inspirowanych naturą. GECCO Companion jest wydarzeniem towarzyszącym głównej konferencji GECCO (np. sesje warsztatowe), nie można jednak uznać, publikacje w materiałach GECCO Companion są równoważne artykułom opublikowanym w głównym nurcie konferencji GECCO, gdyż mają one zazwyczaj krótszą formę i często prezentują wstępne lub cząstkowe wyniki badań. Przyznanie tym pracom 140 p. jest dyskusyjne.

Kolejne dwie prace zostały opublikowane w International Joint Conference on Computational Intelligence (IJCCI), której tematyka obejmuje algorytmy ewolucyjne. To rozpoznawalna i renomowana konferencja z ugruntowaną pozycją w swojej dziedzinie. Ostatnia, przekrojowa praca, została opublikowana w czasopiśmie Applied Sciences o umiarkowanej renomie (IF = 2.5). Tematyka artykułów [1-6] jest spójna z profilem tych konferencji i czasopisma.

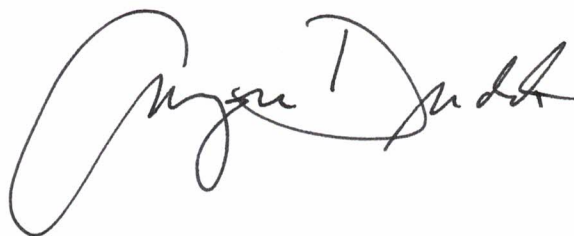
Udział doktoranta w powstaniu artykułów należy uznać za znaczący, gdyż obejmuje on kluczowe elementy prac, takie jak sformułowanie koncepcji badawczej, opracowanie metodyki, udział w analizie wyników oraz współautorstwo tekstu. We wszystkich artykułach doktorant jest pierwszym autorem. Zakres jego wkładu świadczy o samodzielności naukowej.

Nie mam wątpliwości, że autor rozwiązał postawione problemy badawcze i osiągnął założone cele, używając właściwych metod. Oryginalność rozprawy polega na integracji algorytmu JADE z modelami zastępczymi oraz opracowaniu modeli klasyfikacyjnych jako alternatywy dla standardowych modeli regresyjnych. Rozprawa wykorzystuje aktualne osiągnięcia w dziedzinie obliczeń ewolucyjnych. Autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych wyników.

Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Konrada Krawczyka stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wskazuje na wysoki poziom wiedzy teoretycznej Autora z dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja, a także na umiejętność samodzielnego prowadzenia przez niego pracy naukowej. Pomimo zamieszczonych powyżej uwag krytycznych moja generalna opinia o pracy jest pozytywna.

Stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska spełnia wymogi ustawy z 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*. Wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Konrada Krawczyka do publicznej obrony pracy doktorskiej.



**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Krawczyka
pt. „*Analiza i zastosowanie modeli zastępczych do poprawy
efektywności algorytmu JADE*”
wykonanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Jarosława Arabasa**

Niniejsza recenzja rozprawy doktorskiej powstała w związku z wyznaczeniem mnie na recenzenta w przewodzie doktorskim decyzją Rady Dyscypliny Naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej z dnia 21 października 2025 roku (uchwała nr 96/2025). Informację w tej sprawie wraz z tekstem rozprawy otrzymałem 14 listopada 2025 r.

Wprowadzenie

Przedmiotem niniejszej analizy jest rozprawa doktorska przygotowana w formule cyklu publikacji naukowych. Taka forma rozprawy jest zgodna z obowiązującymi przepisami prawa, w szczególności z ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (z późniejszymi zmianami), która dopuszcza możliwość realizacji rozprawy doktorskiej zarówno w postaci monografii, jak i spójnego tematycznie zbioru powiązanych publikacji naukowych. Warunkiem zastosowania tej formuły jest wykazanie jednolitej koncepcji badawczej, jasno określonego celu naukowego oraz spójności problemowej i metodologicznej poszczególnych prac składających się na cykl. Warunki te są jednoznacznie spełnione w przypadku przedstawionej do recenzji rozprawy.

Na cykl publikacji składają się następujące prace:

[P1] Konrad Krawczyk, Jarosław Arabas, *JADE with k Nearest Neighbors Surrogate Model*, wygłoszony na Workshop on Surrogate-Assisted Evolutionary Optimisation (SAEOpt' 23) i opublikowany w materiałach konferencji Conference on Genetic and Evolutionary Computation (GECCO '23 Companion), która posiada kategorię A w rankingu ICORE.

[P2] Konrad Krawczyk, Jarosław Arabas, *Comparison of Different Surrogate Models for the JADE Algorithm*, opublikowany w materiałach konferencji 15th International Joint Conference on Computational Intelligence (IJCCI '23),

[P3] Konrad Krawczyk, Jarosław Arabas, *Empirical Study of Surrogate Model Assisting JADE: Relation Between the Model Accuracy and the Optimization Efficiency*, wygłoszony Workshop on Surrogate-Assisted Evolutionary Optimisation (SAEOpt 24') i opublikowany w materiałach konferencji Conference on Genetic and Evolutionary Computation (GECCO '24 Companion),

[P4] Konrad Krawczyk, Jarosław Arabas, *What Is the Impact of Typical Surrogate Models on the Performance of the JADE Algorithm?*, opublikowany jako rozdział w woluminie 1196 serii książkowej Studies on Computational Intelligence wydawnictwa Springer.

[P5] Konrad Krawczyk, Jarosław Arabas, *From 'How Good?' to 'Is it Better?': Classification-Based Surrogate Models for JADE*, wygłoszony Workshop on Surrogate-Assisted Evolutionary Optimisation (SAEOpt 25') i opublikowany w materiałach konferencji Conference on Genetic and Evolutionary Computation (GECCO '25 Companion),

[P6] Konrad Krawczyk, Jarosław Arabas, *Single-Objective Surrogate Models for Continuous Metaheuristics: An Overview*, opublikowany w 2025 roku w czasopiśmie Applied Sciences, wydawanym przez wydawnictwo MDPI (IF=2,5),

opatrzone stosownym wstępem, przeglądem literatury przedmiotu oraz omówieniem uzyskanych wyników. W każdej z tych prac doktorant miał istotny wkład, zarówno w aspekt planowania jak i realizacji badań.

W kolejnych częściach niniejszej recenzji skupię się na analizie treści recenzowanej rozprawy, jej ocenie merytorycznej oraz uwagach szczegółowych. Przedstawione rozważania i wnioski cząstkowe będą służyć do sformułowania całościowej oceny pracy oraz wydania ostatecznego opinii dotyczącej spełnienia przez rozprawę wymogów stawianych rozprawom doktorskim.

Zawartość rozprawy

Tekst rozprawy liczy 117 stron, a jego najistotniejszą część stanowi omówienie najważniejszych wyników zgrupowanych wokół czterech zagadnień.

Pierwszym z nich jest opracowanie i przetestowanie integracji algorytmu JADE z modelami zastępczymi. W tym celu wprowadzono do standardowej pętli algorytmu procedurę rankingową, sterującą wykorzystaniem i douczaniem modelu zastępczego. Dzięki wykorzystaniu tej procedury ewaluacja funkcji celu są odbywa się jedynie dla najbardziej obiecujących kandydatów. Opis algorytmu, wraz z eksperymentalną walidacją przedstawiono w pracy [P1].

Drugim istotnym tematem badawczym było porównanie efektywności różnych typów regresyjnych modeli zastępczych które można użyć w ramach wprowadzonej metody. W

celu ustalenia rekomendowanego sposobu konstrukcji modeli autor przeprowadził eksperymenty na funkcjach testowych zgrupowanych w benchmarku CEC 2013, rozpatrując dwa różne wymiary przestrzeni rozwiązań dopuszczalnych. Te aspekty badań własnych autor przedstawił w pracach [P2] i [P4].

Trzecim zagadnieniem podejmowanym w recenzowanym cyklu było pogłębienie analizy modeli zastępczych wspierających działanie algorytmu JADE o weryfikację nie tylko bezwzględnej dokładności predykcji, ale też stopnia zachowania rankingu rozwiązań w populacji. W toku badań przedstawionych w pracy [P3] autor empirycznie potwierdził, że dla efektywności algorytmu JADE zintegrowanego z procedurą rankingową, zdolność modelu do zachowania prawidłowego rankingu rozwiązań jest ważniejsza niż jego bezwzględna dokładność predykcyjna.

To spostrzeżenie, poparte rzetelną analizą statystyczną, prowadzi w sposób naturalny do kolejnego, czwartego zagadnienia badawczego - zmiany paradygmatu z regresji na klasyfikację. Zaproponowane zastępcze modele klasyfikacyjne, a w szczególności autorski model CACS, stanowią nie tylko usprawnienie konkretnego algorytmu, lecz również ważny wkład koncepcyjny do projektowania algorytmów ewolucyjnych wspieranych przez modele zastępcze (ang. Surrogate Assisted EA).

Uzupełnieniem wymienionych wyżej rozważań jest wnikliwy przegląd metod konstrukcji modeli zastępczych który autor zawarł w pracy [P6]. Dotyczy on w ogólności metod stosowanych w heurystycznej optymalizacji ciągłej i wyróżnia sześć kategorii metod, wskazując ich kluczowe cechy, zastosowania i ograniczenia.

Ocena merytoryczna

Choć autor nie formułuje wprost hipotez badawczych, to przyjęta konstrukcja pracy - oparta na jasno zdefiniowanych problemach badawczych i ich systematycznej weryfikacji eksperymentalnej - sprawia, że brak ten nie wpływa negatywnie na klarowność narracji ani na ocenę poprawności metodologicznej rozprawy. Największym osiągnięciem rozprawy jest opracowanie i empiryczne ugruntowanie spójnego, konsekwentnie realizowanego podejścia badawczego do integracji modeli zastępczych z algorytmem ewolucyjnym JADE, prowadzącego do istotnej poprawy jego efektywności w zadaniach kosztownej optymalizacji ciągłej. Wkład pracy nie polega na pojedynczym rozwiązaniu algorytmicznym, lecz na pełnym cyklu badawczym, w którym kolejne publikacje stanowią logiczne, wzajemnie uzasadnione etapy coraz głębszego rozumienia relacji pomiędzy algorytmem ewolucyjnym a wspomagającym go modelem zastępczym. Rozprawa charakteryzuje się wyjątkową spójnością problematyki badawczej: wszystkie prace składające się na cykl publikacyjny koncentrują się na jednym, jasno zdefiniowanym celu - przyspieszeniu algorytmu JADE poprzez redukcję liczby kosztownych ewaluacji funkcji celu, bez degradacji jakości otrzymywanych rozwiązań.

Autor nie zmienia ad hoc ani algorytmu bazowego, ani klasy rozważanych problemów, co pozwala na rzetelne porównania oraz wiarygodne wnioskowanie. Każdy kolejny etap badań wynika bezpośrednio z obserwacji poczynionych w etapie poprzednim, co świadczy o dojrzałym podejściu do prowadzenia badań naukowych.

Na szczególne podkreślenie zasługuje wysoki poziom poprawności metodologicznej badań eksperymentalnych. Autor stosuje uznane benchmarki (CEC), analizuje wpływ wymiarowości problemu, unika nadmiernego strojenia hiperparametrów i konsekwentnie korzysta z analiz statystycznych zgodnych z dobrymi praktykami w obliczeniach ewolucyjnych. Dzięki temu uzyskane wyniki mają charakter generalizowalny i porównywalny z innymi pracami w dyscyplinie.

Całość dopełnia publikacja przeglądowa, która nie jest jedynie dodatkiem, lecz pełni rolę teoretycznego “zwornika” całej rozprawy. Zaproponowane w niej ramy koncepcyjne porządkują decyzje projektowe w algorytmach SAEA i jednocześnie wyjaśniają, dlaczego podejście obrane w części eksperymentalnej rozprawy jest spójne i uzasadnione.

Podsumowując, największym wkładem rozprawy jest nie tylko poprawa efektywności algorytmu JADE, lecz przede wszystkim metodyczne rozpracowanie problemu integracji modeli zastępczych z algorytmami ewolucyjnymi, prowadzące od adaptacji istniejącej idei, przez jej krytyczną weryfikację, aż po zaproponowanie nowego, lepiej dopasowanego paradygmatu.

W warstwie technicznej publikacji i tekst przygotowane są bardzo starannie. Opis algorytmów jest precyzyjny i jednoznaczny, a prezentacja wyników eksperymentalnych – czytelna i spójna. Całość sprawia wrażenie pracy dopracowanej edytorsko i metodologicznie, co dodatkowo wzmacnia wiarygodność przedstawionych wyników i wniosków.

Uwagi szczegółowe

Po analizie przedstawionych prac oraz ich podsumowania w tekście rozprawy pozwalam sobie sformułować następujące uwagi szczegółowe:

1. Autor w pracach oparł eksperymentalną weryfikację o benchmark CEC2013; jest to benchmark, który doczekał się aktualizacji i choć trzon używanych funkcji jest w nich niezmienny to jednak można było sięgnąć po nowsze funkcje testowe (późniejsze benchmarki zawierały elementy takie jak rotacje, przesunięcia, funkcje złożone (composition functions), niestacjonarność itd.). Algorytmy były również testowane w ramach ocenianego cyklu publikacji na problemach o średniej wymiarowości, tj. $D=10$ i $D=30$. Interesujące byłoby zapoznanie się z wynikami np. dla $D=50$.

2. Autor w pracach wspomina, że jednym z założeń/zalet stosowania modeli zastępczych jest skrócenie czasu optymalizacji. Tym bardziej zaskakujący jest brak rozważań na temat czasu obliczeń stowarzyszonych z użyciem kombinacji JADE + model zastępczy.

3. W pracy szczegółowo opisano procedurę rankingową zarządzającą wykorzystaniem modelu zastępczego (m.in. parametry takie jak `n_init`, `n_b`, próg stabilności rankingu). Są to jednak parametry projektowe o istotnym wpływie na zachowanie algorytmu, a ich wartości są przyjmowane jako stałe lub ustalone empirycznie. Brakuje systematycznej analizy wrażliwości metody na ich zmianę lub przynajmniej dyskusji, na ile zaproponowane ustawienia są specyficzne dla benchmarku CEC2013 i algorytmu JADE. Taka analiza mogłaby dodatkowo wzmocnić praktyczny charakter zaproponowanego rozwiązania. Podobnej analizy nie doczekały się parametry metod budowy modeli zastępczych, gdzie użyto wartości uznanych za domyślne.

4. Chociaż eksperymenty są przeprowadzone w sposób metodycznie poprawny, praca nie porusza kwestii dostępności implementacji ani replikowalności badań (np. publiczne repozytorium, framework eksperymentalny). W aktualnych standardach badań w obliczeniach ewolucyjnych jest to coraz częściej oczekiwany element, zwłaszcza przy pracach o charakterze algorytmicznym.

Warto przy tym nadmienić, że moje uwagi mają charakter dyskusji naukowej, nie umniejszają wartości dysertacji i nie podważają jakości uzyskanych wyników.

Podsumowanie

Stwierdzam jednoznacznie, że przedłożona rozprawa doktorska pt. „Analiza i zastosowanie modeli zastępczych do poprawy efektywności algorytmu JADE” stanowi samodzielne i oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w obowiązujących przepisach.

Autor wykazał się dojrzałością naukową, umiejętnością prowadzenia samodzielnych badań oraz właściwym warsztatem metodologicznym. Uzyskane wyniki posiadają istotną wartość poznawczą i wzbogacają dorobek naukowy dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja w obszarze obliczeń inspirowanych naturą.

W związku z powyższym wnioskuję o **dopuszczenie rozprawy doktorskiej** do publicznej obrony.

Warszawa, 27 lutego 2026

dr hab. inż. Krzysztof Trojanowski, prof. uczelni
Wydział Matematyczno-Przyrodniczy. Szkoła Nauk Ścisłych
Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Konrada Krawczyka pt.
"Analiza i zastosowanie modeli zastępczych do poprawy efektywności algorytmu JADE"

Przedstawiona do recenzji praca dotyczy metod optymalizacji heurystycznej zadań jednokryterialnych. Autor zajmuje się w pracy rozwiązaniami dla szczególnego rodzaju zadania: oszczędzania wywołań funkcji celu w czasie procesu optymalizacji ze względu na jej wysoki koszt finansowy, czasowy lub zasobów obliczeniowych. Cel minimalizacji liczby wywołań może być osiągniany w oczywisty sposób przez podnoszenie efektywności kroków algorytmów heurystycznych, w tym operatorów perturbacji, metod selekcji, strategii zarządzania populacją i innych działań, co jest ogólnym celem badań społeczności naukowej zajmującej się tymi algorytmami. Istnieje jednak też grupa innych rozwiązań oszczędzających wywołania funkcji celu, która wprowadza do algorytmu modele zastępcze przybliżające wartości rozwiązań w populacji. Wybór i zastosowanie modeli zastępczych w algorytmach SAEA (Surrogate-Assisted Evolutionary Algorithms) stanowi główny temat pracy. Jest to tematyka bardzo aktualna i obecnie intensywnie rozwijana, czego przykładem może być Workshop on Surrogate-Assisted Evolutionary Optimisation odbywający się w tym roku w ramach dobrze rozpoznawalnej w środowisku, prestiżowej konferencji Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2026). Autor wybrał do swoich badań algorytm ewolucji różnicowej JADE (Adaptive Differential Evolution with Optional External Archive), zaproponowany w 2009 roku przez Zhang i Sandersona. Zauważył, że w początkowym kroku pętli głównej algorytmu zostaje wybrany podzbiór najlepszych rozwiązań z bieżącej populacji, który potem znajduje zastosowanie w kolejnych krokach. Do tej czynności konieczne jest sporządzenie rankingu rozwiązań w populacji. Czynność ta nie wymaga jednak dokładnej znajomości wartości funkcji celu, a jedynie odpowiedzi na wielokrotnie zadane pytania, które z dwóch wskazanych rozwiązań powinno stać wyżej w rankingu. Jest to szczególny krok w pętli głównej JADE, ponieważ dla zaoszczędzenia wywołań kosztownej funkcji celu mogą w nim zostać wykorzystane wartości przybliżone rozwiązań. Tego właśnie dotyczy główny cel pracy, którym jest opracowanie, implementacja i kompleksowa weryfikacja metody integracji procedury Kerna z algorytmem JADE dla wybranych różnych typów modeli zastępczych. Hipotezą badawczą prezentowaną jako cel pracy jest wykazanie, że JADE rozszerzone o model zastępczy do ewaluacji funkcji celu pozwala uzyskać „szybszą optymalizację”, tj. uzyskać lepsze jakościowo rozwiązania dla ustalonego budżetu funkcji celu, bądź wcześniej uzyskać rozwiązania porównywalne jakościowo z rozwiązaniami zwracanymi przez JADE, który nie został rozszerzony o model zastępczy funkcji celu.

Rozprawa doktorska mgr inż. Konrada Krawczyka liczy 117 stron i jest napisana w języku polskim (autoreferat) i angielskim (artykuły). Składa się z dwóch części. Pierwsza to autoreferat

zawierający cztery rozdziały. Pierwszy prezentuje kontekst naukowy i cel pracy, drugi – założenia teoretyczne badań i przegląd literatury, trzeci – omawia cykl badawczy, a całość zamyka ostatni czwarty, zawierający podsumowanie. Bibliografia do autoreferatu zawiera 36 pozycji. W drugiej części autor zamieścił pełne teksty sześciu artykułów, na których oparta jest praca. Struktura pracy jest regularna, właściwa dla prac dyplomowych mających formę spójnego tematycznie zbioru opublikowanych artykułów naukowych¹.

W pierwszym rozdziale autoreferatu autor prezentuje motywację swoich badań, cel pracy (równoważny hipotezie badawczej) oraz listę zadań badawczych prowadzących do wykazania prawdziwości postawionej hipotezy. Rozdział kończy lista publikacji, na których opiera się rozprawa. Drugi rozdział zawiera przegląd literatury przedmiotu dotyczącej poszczególnych aspektów prowadzonych badań. Wskazane i omówione zostały trzy główne podejścia, ich zadania oraz stosowane modele. Wskazane również zostały strategie modelowania: globalna, lokalna, w postaci komitetów modeli, a także hierarchiczna struktura organizowania modeli w tych algorytmach, gdzie stosowany jest więcej niż jeden. Wspomniane zostały strategie wyboru rozwiązań, dla których zostanie wywołana kosztowna funkcja, oraz strategie zapominania rozwiązań z przepełnionego archiwum. Objasnione zostały tryby interpolacji oraz ekstrapolacji w działaniu modelu oraz wymienione zostały tendencje przewidywania obserwowane w modelach różnego typu. Na koniec omówiony został klasyczny szkielet procedury projektowania i implementacji SAEA. Trzeci rozdział omawia cykl badawczy oraz uzyskane wyniki. Rozpoczyna się od omówienia ogólnej metody integracji JADE z modelem zastępczym, w tym prezentacji pseudokodu JADE rozszerzonego o procedurę rankingową oraz dokładnego pseudokodu tej procedury. Aby wykazać poprawność i skuteczność tego rozwiązania, został wybrany prosty model zastępczy oparty na metodzie k najbliższych sąsiadów oraz przeprowadzone eksperymenty na zadaniach optymalizacyjnych z benchmarku CEC2013 (Congress on Evolutionary Computation 2013: Special Session and Competition on Niching Methods for Multimodal Function Optimization). Następnym etapem cyklu było porównanie efektywności różnych typów regresyjnych modeli zastępczych, określenie wpływu rozmiaru archiwum na wyniki oraz ocena skalowalności proponowanego rozwiązania. Kolejny etap dotyczył określenia znaczenia dokładności predykcji modelu zastępczego dla efektywności pracy rozszerzonego JADE, co jest istotne przy wyborze typu modelu zastępczego. Ostatni etap cyklu dotyczył zamiany modeli regresyjnych na modele klasyfikacyjne i wykorzystania ich do porównywania jakości rozwiązań zwracanych przez rozszerzony JADE. W Podsumowaniu autor zebrał najważniejsze obserwacje i konkludował wyniki swoich badań. Rozdział ten kończy prezentacja potencjalnych kierunków dalszych badań.

W drugiej części, zawierającej zbiór opublikowanych artykułów naukowych, autor zamieścił sześć publikacji. Wszystkie są napisane we współautorstwie z promotorem, przy czym autor zawsze jest wymieniany jako pierwszy autor. Materiał zawarty w publikacjach jest zgodny z etapami cyklu badawczego przedstawionymi w autoreferacie w rozdziale 3. We wszystkich publikacjach indywidualny wkład autora dotyczy przeglądu literatury, implementacji algorytmów, wykonania badań eksperymentalnych i analizy otrzymanych danych. Wspólna praca autorów obejmowała natomiast stworzenie planu badawczego oraz interpretację uzyskanych wyników i wyciągnięcie

¹ Ustawa z 14 marca 2003 z pozn. zm., Art.13, ust.2

wniosków. Mimo opisowego określenia udziału autora nie zawierającego procentowych wartości można stwierdzić, że udział autora jest znaczny, z pewnością większy niż 50%.

Artykuły P1, P3 i P5 (symbole wg notacji z podrozdziału 1.3 *Publikacje w cyklu badawczym*) zostały opublikowane na wspomnianej wcześniej konferencji GECCO w edycjach 2023, 2024 i 2025. Publikacja P6 została opublikowana w czasopiśmie *Applied Sciences*, którego 5-letni Impact Factor wynosi 2.7. Pozostałe dwa, P2 i P4 również zostały opublikowane w materiałach międzynarodowych konferencji. Powyższe informacje dotyczące miejsc publikacji świadczą o tym, że prezentowane badania zostały zweryfikowane przez środowisko naukowe z dziedziny optymalizacji ewolucyjnej i to przez wymagające grupy recenzentów.

Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadczącą o dostatecznej wiedzy autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny, przekonujący?

W autoreferacie autor powołuje się na 36 pozycji bibliograficznych. W dołączonych artykułach listy referencji mają: 8 pozycji w P1, 19 – P2, 25 – P3, 21 – P4, 13 – P5, a ostatni artykuł, P6 ma 139 referencji. Ten ostatni artykuł zgodnie z tytułem stanowi przegląd modeli zastępczych w zastosowaniach do heurystycznej optymalizacji numerycznej zadań jednokryterialnych. We wstępie tego artykułu znajdujemy odniesienie do wcześniejszych przeglądów tego obszaru wiedzy, a następnie omówienie poszczególnych klas modeli (regresji, klasyfikacyjnych, rankingowych) pod względem oczekiwań stawianych przed modelem, omówienie poszczególnych klas modeli, a na koniec – strategii zarządzania populacją rozwiązań ocenionych funkcją celu, czyli uczących dla modeli. Lista omówionych modeli jest bogata i świadczy o dobrym zaznajomieniu autora z aktualnym stanem dziedziny. Wnioski, które wyciąga z przeglądu źródeł są właściwe.

Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Autor postawił sobie za cel opracowanie, implementację i kompleksową weryfikację metody integracji procedury Kerna z algorytmem JADE. Procedura zawiera ustaloną sekwencję kroków której rezultatem jest ranking rozwiązań podanych na wejściu (Algorytm 2. w publikacji P2). Elementem odpowiedzialnym za jakość wyniku pracy procedury jest typ modelu zastępczego wykorzystywanego przy ewaluacji nowych rozwiązań. W tym kontekście słowo *integracja* reprezentuje zarówno sposób włączenia procedury Kerna w JADE poprzez dodanie nowych kroków i zmodyfikowanie niektórych istniejących, jak też dobór właściwego typu modelu zastępczego. Autor osiągnął swój cel w kolejnych krokach: w artykule P1 zintegrował JADE z procedurą Kerna (Algorytm 1.) dla modelu regresyjnego oraz zademonstrował poprawne i efektywne działanie tej zmodyfikowanej postaci algorytmu w artykułach P2, P3 i P4. W P5 pokazuje efektywną integrację z modelami zastępczymi klasyfikacyjnymi, z których jeden okazał się najbardziej skuteczny w porównaniu z wszystkimi pozostałymi, tj. klasyfikacyjnymi i regresyjnymi. Wszystkie obserwacje i oceny autora powstały na podstawie badań eksperymentalnych. Taka metoda jest uzasadniona dla algorytmów z rodziny ewolucji różnicowej, a autor dochował staranności przy stosowaniu zasad eksperymentu naukowego.

Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Samodzielny i oryginalny dorobek autora to integracja JADE z procedurą Kerna dla modelu regresyjnego oraz integracja z modelami klasyfikacyjnymi. Skuteczność tych rozszerzonych wersji JADE, które – ze względu na zakres zmian w liście kroków JADE oraz wykorzystanie zupełnie odrębnych mechanizmów – można nazwać nowymi algorytmami wywodzącymi się z JADE, została zweryfikowana eksperymentalnie na klasycznym, dobrze znanym w środowisku badawczym benchmarku CEC2013. Autor wskazuje też przegląd literatury przedmiotu jako samodzielny i oryginalny dorobek, z czym można się zgodzić, ze względu na rozległość tego przeglądu oraz fakt publikacji artykułu zawierającego wyłącznie ten przegląd w *Applied Sciences*. Artykuł ten, mimo że opublikowany zaledwie sześć miesięcy temu, już ma swoje pierwsze cytowanie w publikacji autorów z Aston University, Birmingham (2026).

Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Struktura przedłożonej rozprawy jest poprawna. Problem naukowy został dobrze sformułowany, a prawdziwość tezy badawczej potwierdzona w badaniach eksperymentalnych, których metodologia i zakres nie budzą wątpliwości. Artykuły zawierają pewne oczywiste powtórzenia, choć nigdy słowo w słowo, np. opis JADE z modelem zastępczym wraz pseudokodami, ale nie mogło być inaczej, jeżeli artykuły były publikowane oddzielnie w różnym czasie i dla różnego audytorium. W obrębie artykułów prezentacja wyników jest zwięzła i jasna, a prezentowane wyniki eksperymentów w poszczególnych artykułach nie powtarzają się.

Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Praca jest napisana poprawnie, obecne są wszystkie obowiązkowe składowe rozprawy z dziedziny nauk technicznych. Eksperymenty zostały przeprowadzone zgodnie metodologią naukową właściwą dla algorytmów optymalizacji heurystycznej. Ewentualnie można tylko byłoby się pokusić o większą liczę porównań. Obecnie zaproponowane przez autora algorytmy zostały eksperymentalnie porównane ze sobą na benchmarku CEC2013, aby ocenić skuteczność stosowania różnych modeli zastępczych w JADE oraz z oryginalną wersją JADE. Na przykład z wykorzystaniem tego samego benchmarku można byłoby zweryfikować inne klasyczne algorytmy aby zobaczyć skalę poprawy. Takie algorytmy są gotowe w bibliotekach kodu, np. PYMOO². Ewentualnie porównać z wynikami tych algorytmów z innych publikacji. Celem takich porównań było pokazanie skali poprawy wyników w kontekście skuteczności wielu innych algorytmów, tj. odpowiedzi na pytanie, czy ta poprawa wyników jest znacząca i zmienia porządek na liście rankingowej algorytmów, czy choć relatywnie istotna, to nie zmienia tego porządku.

Druga uwaga dotyczy strojenia parametrów modeli zastępczych. Autor dla modelu regresji kNN dokonał pewnego wstępnego strojenia wartości k przed jej finalnym ustaleniem, jednak dla pozostałych modeli regresyjnych, SVR, RFR, and XGBoost został przy wartościach domyślnych podanych w bibliotekach kodu (P2 i P4, sekcja 4.1.2, ostatni akapit). Co prawda nie ma tych parametrów dużo i nie ma szczególnie dużego pola manewru z ich wartościami, ale mimo to

² <https://pymoo.org/>

można byłoby najpierw poszukać ich najkorzystniejszych ustawień. Dla modeli klasyfikacyjnych jest inaczej, wstępne strojenie zostało wykonane (P5, sekcja 4). Raczej nie spodziewałbym się szczególnego zwrotu, gdyby wykonano takie wstępne strojenie parametrów również dla SVR, RFR i XGBoost. Jednak ponieważ autor pisze "Wynik ten [tj. uzyskany przez CACS] był wyraźnie lepszy od JADE wspomaganego modelem regresyjnym z poprzednich badań" (Autoreferat, str. 30), a poniżej tego zdania można znaleźć jeszcze kilka innych obserwacji dotyczących przewagi podejść klasyfikacyjnych, to oczekiwanie podobnej staranności w dostrojeniu parametrów w każdym z porównywanych modeli staje się uzasadnione.

Ostatnia uwaga dotyczy braku rozdziału z przykładowym zastosowaniem proponowanych rozwiązań do praktycznego problemu technicznego. Jest to bardzo dyskusyjna uwaga, ponieważ badania autora miały charakter w znacznej mierze teoretyczny. Celem pracy było zaproponowanie i zweryfikowanie skuteczności pewnego rozszerzenia JADE, które – mówiąc językiem programistów – ma raczej charakter niskopoziomowy. Aby zweryfikować algorytm w praktycznym zastosowaniu należałoby go jeszcze dostosować do typu problemu (reprezentacja rozwiązania uwzględniająca cechy dziedziny i krajobrazu funkcji oceny, specyficzne operatory perturbacji, itd.), co prawdopodobnie nic nie wniosłoby nowego w kontekście postawionego celu pracy. Taki rozdział z praktycznym przykładem zastosowania podniósłby ogólne walory pracy, ale z drugiej strony jego brak nie zmienia faktu, że praca jest kompletna i zawiera wszystkie niezbędne elementy.

Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Praca wpisuje się w dziedzinę nauk technicznych: obejmuje swoim zakresem badania nad podnoszeniem efektywności heurystycznych metod optymalizacji. Proponowane nowe rozszerzenia JADE zostały pozytywnie zweryfikowane podczas badań eksperymentalnych na trudnym zbiorze zadań benchmarkowych oraz przez środowisko badawcze na wymagających konferencjach i w czasopiśmie. Ze względu na obszar zastosowań nowej metody i na zakres przeprowadzonych eksperymentów, uzyskane wyniki należy uznać za użyteczne dla nauk technicznych.

Konkluzja końcowa

Podsumowując stwierdzam, że tematyka rozprawy jest aktualna i ważna, rozprawa prezentuje oryginalne rozwiązanie zadania poprawienia efektywności JADE dla zadań z kosztowną funkcją celu przez włączenie w jego działanie modelu zastępczego do aproksymacji wartości funkcji celu. Uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Konrada Krawczyka spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr. 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami) z późniejszymi zmianami w brzmieniu z dnia 15 września 2017 r. (Dz. U. 2017 r. poz. 1789.), zgodnie z Art. 175. 1. Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę — Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 r. poz. 1669). Wnioskuje o dopuszczenie autora do dalszych etapów postępowania o nadanie tytułu doktora.

dr hab. inż. Krzysztof Trojanowski