

Recenzja rozprawy doktorskiej Pawła Bratka:
*Metody i algorytmy adaptacji obliczeń uczenia
maszynowego i aplikacji numerycznych do
wysokowydajnych systemów komputerowych*

dr hab. Przemysław Stpiczyński, prof. UMCS*

19 stycznia 2026

1 Informacje ogólne

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Pawła Bratka *Metody i algorytmy adaptacji obliczeń uczenia maszynowego i aplikacji numerycznych do wysokowydajnych systemów komputerowych*. Recenzja została wykonana na mocy Uchwały Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Częstochowskiej nr 1/2025/2026 z dnia 16 października 2025. Promotorem w postępowaniu o nadanie stopnia doktora jest dr hab. inż. Łukasz Szustak, prof. PCz.

2 Sylwetka kandydata

Mgr inż. Paweł Bratek otrzymał tytuły zawodowe licencjata i magistra matematyki na Politechnice Częstochowskiej odpowiednio w latach 2017 i 2019. W roku 2020 uzyskał na

*Instytut Informatyki i Matematyki, Uniwersytet Marii-Curie Skłodowskiej, Akademicka 9/519, 20-032 Lublin, email:przemyslaw.stpiczynski@umcs.pl

tej samej uczelni tytuł zawodowy inżyniera informatyki. W roku 2019 ukończył również fakultatywnie studia pedagogiczne w Studium Kształcenia i Doskonalenia Nauczycieli Politechniki Częstochowskiej. Od roku 2021 jest zatrudniony w Katedrze Informatyki Politechniki Częstochowskiej, początkowo jako pracownik badawczy, a od roku 2023 badawczo-dydaktyczny w pełnym wymiarze czasu pracy. Uczestniczył w realizacji dwóch projektów badawczych oraz prowadził zajęcia dydaktyczne z przedmiotów informatycznych. Jest współautorem dziesięciu publikacji w materiałach prestiżowych międzynarodowych konferencji naukowych (w tym kilka edycji Euro-Par) oraz renomowanych czasopismach (JPDC, IJHPCA, FGCS). Aktualnie w bazie Scopus jest indeksowanych osiem prac, łączna liczba cytowań to 28, zaś h-indeks wynosi 3.

3 Opis rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa składa się z ośmiu rozdziałów, aneksu oraz bibliografii liczącej 85 pozycji. Treść uzupełniają dodatkowo spisy rysunków, tabel oraz listingów. Praca zawiera również streszczenia w języku polskim i angielskim. Całość zajmuje 156 stron. Struktura pracy jest właściwa i sprzyja bezproblemowemu poznawaniu przedstawianych treści. Wyniki prezentowane na wykresach i w tabelach są szczegółowo omawiane i interpretowane. Autor często odwołuje się do bibliografii zawierającej pozycje literatury naukowej z ostatnich lat.

Rozprawa doktorska poświęcona jest zagadnieniom poszukiwania metod poprawy efektywności realizacji aplikacji numerycznych oraz obliczeń związanych z uczeniem maszynowym, w tym redukcji zużycia energii elektrycznej w wysokowydajnych systemach obliczeniowych, ze szczególnym uwzględnieniem architektur równoległych oraz heterogenicznych platform sprzętowych. Praca łączy podejście teoretyczne z szeroko zakrojoną ewaluacją eksperymentalną, prezentując autorskie metody, modele kosztowe oraz implementacje programistyczne.

Pierwszy rozdział rozprawy stanowi wprowadzenie do rozważanej tematyki badawczej. Autor przedstawił w nim kontekst prowadzonych badań oraz ich znaczenie dla efektywnej realizacji wybranych typów obliczeń numerycznych oraz zagadnień związanych z

uczeniem maszynowym na współczesnych wysokowydajnych systemach komputerowych. Sformułował tezę badawczą w następującej postaci:

Przeprowadzone badania wskazują na możliwość opracowania metod i algorytmów prowadzących do poprawy efektywności obliczeniowej i energetycznej uczenia maszynowego oraz aplikacji numerycznych w środowisku wysokowydajnych systemów komputerowych.

Następnie określił główny cel badawczy jako

opracowanie i eksperymentalna weryfikacja metod oraz algorytmów poprawiających efektywność obliczeniową i energetyczną uczenia maszynowego oraz aplikacji numerycznych w środowisku wysokowydajnych systemów komputerowych

oraz cele szczegółowe pracy, których realizacja ma prowadzić do udowodnienia tezy. Autor zaprezentował również logiczną strukturę rozprawy i zależności pomiędzy poszczególnymi rozdziałami.

Rozdział drugi poświęcony jest zagadnieniu adaptacji obliczeń numerycznych opartych na modelu równoległości danych do komputerowych architektur wysokowydajnych, ze szczególnym uwzględnieniem aspektu efektywności energetycznej implementacji równoległych. Omówiono zastosowane aplikacje testowe (problem trójwymiarowej dyfuzji oraz wielowymiarowy dodatnio określony algorytm adwekcji) oraz sformułowano problem badawczy i motywację do podjęcia prac. Następnie przedstawiono koncepcję zarządzania częstotliwością grup rdzeni procesora jako mechanizmu redukcji zużycia energii. Rozdział zawiera opis opracowanych algorytmów wyznaczania optymalnej konfiguracji częstotliwości na podstawie pomiarów czasu wykonania i poboru energii, a także szczegółowe wyniki eksperymentalnej weryfikacji na platformach (serwerach obliczeniowych) firm Intel i AMD, które potwierdzają przewagę opracowanego podejścia heterogenicznego nad homogenicznym.

Rozdział trzeci rozpoczyna drugą część pracy od wprowadzenia w problematykę adaptacji algorytmów uczenia maszynowego do wysokowydajnych systemów komputerowych. Przedstawiono formalne (matematyczne), zilustrowane przykładami, podstawy zapytań zliczających oraz omówiono ich rolę w procesach uczenia maszynowego modeli probabilistycznych. Zaprezentowano również bibliotekę SABNAtk jako narzędzie open-source wspierające efektywną realizację tego typu zapytań. Rozdział kończy szczegółowy opis metodologii ewaluacji, stanowiącej wspólną podstawę dla badań przedstawionych w kolejnych rozdziałach.

Kolejny rozdział koncentruje się na optymalizacji wydajności realizacji zapytań zliczających w ramach strategii opartej na reprezentacji stanów zmiennych za pomocą bitmap oraz algorytmie przeszukiwania w głąb. Zaproponowano dwie autorskie metody, z których pierwsza ogranicza liczbę kosztownych operacji przecięć bitmap, a druga zmniejsza liczbę odwiedzanych węzłów drzewa przeszukiwania. Skuteczność obu podejść oceniono w szeroko zakrojonych badaniach eksperymentalnych, przeprowadzonych na różnych platformach obliczeniowych z wykorzystaniem benchmarków losowych zapytań.

Rozdział piąty przedstawia autorską metodę automatycznego wyboru strategii realizacji zapytań zliczających w strumieniu zapytań. Opisano motywację podjęcia problemu oraz koncepcję rozwiązania opartą na modelach kosztu, wyprowadzonych na podstawie analizy matematycznej rozważanego zagadnienia opartej na modelu kosztu realizacji zapytań wykorzystujących strategię CT, RAD i BV. Zaprezentowano algorytmy aktualizacji modeli oraz mechanizmy przetwarzania zapytań w sposób adaptacyjny. Istotną część rozdziału stanowi także opis praktycznej implementacji metody jako niezależnej strategii w bibliotece SABNAtk oraz wyniki porównań z innymi podejściami w benchmarkach i rzeczywistej aplikacji uczenia sieci Bayesowskich.

Następny rozdział poświęcony jest rozszerzeniu metody automatycznego wyboru strategii o model wielowątkowy, wykorzystujący równoległość zadań. Omówiono potencjalne problemy synchronizacji wątków, w szczególności sytuacje jednoczesnego dostępu do danych oraz zaprezentowano zastosowanie mechanizmów wzajemnego wykluczania do zapewnienia poprawności działania implementacji. Rozdział zawiera również wyniki badań

wydajnościowych, przeprowadzonych na różnych platformach obliczeniowych oraz w rzeczywistej aplikacji uczenia maszynowego zrównoleglonej z użyciem biblioteki Intel TBB.

W rozdziale siódmym autor prezentuje metodę równoległej realizacji zapytań zliczających dostosowaną do architektur ccNUMA, charakteryzujących się niejednorodnym dostępem do pamięci. Opisuje wpływ lokalności danych na wydajność oraz proponuje rozwiązanie niezależne od stosowanej strategii realizacji zapytań, możliwe do integracji z metodą automatycznego wyboru strategii. Skuteczność podejścia została zweryfikowana eksperymentalnie poprzez porównanie z klasycznym zrównoleglaniem z użyciem interfejsu OpenMP na dwóch platformach obliczeniowych.

Ostatni, ósmy rozdział zawiera podsumowanie wyników opisanych w rozprawie. Autor formułuje najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych badań oraz wskazuje potencjalne kierunki dalszych prac badawczych i rozwoju zaproponowanych metod. Treść pracy uzupełnia aneks prezentujący wybrane fragmenty kodu źródłowego oprogramowania opisywanego w rozdziałach 3–7.

4 Dyskusja

Podjęcie tematyki badań obejmujących metody i algorytmy adaptacji aplikacji numerycznych oraz obliczeń związanych z uczeniem maszynowym do wysokowydajnych systemów komputerowych jest w pełni uzasadnione i istotne z punktu widzenia zarówno rozwoju nauki, jak i praktycznych zastosowań. Dynamiczny wzrost złożoności modeli uczenia maszynowego oraz skali przetwarzanych danych powoduje, że efektywne wykorzystanie współczesnych architektur wielordzeniowych, w tym heterogenicznych, staje się kluczowym wyzwaniem badawczym, a dzięki uzyskanym wynikom możliwe jest skracanie czasu obliczeń oraz możliwość rozwiązywania problemów obliczeniowych o istotnie większym rozmiarze. Należy również odnotować rosnące znaczenie efektywności energetycznej w centrach danych i systemach obliczeniowych, które sprawia, że adaptacyjne metody optymalizacji obliczeń mają bezpośredni wpływ na koszty eksploatacji i zrównoważony rozwój infrastruktury IT. Połączenie zagadnień wydajności, skalowalności i energooszczędności czyni tematykę pracy aktualną oraz interdyscyplinarną.

Dodatkowo należy wskazać na wysoki potencjał aplikacyjny wyników prac badawczych uzyskiwanych w obszarach takich jak analiza danych, symulacje naukowe czy systemy inteligentne. Autor podjął się zatem realizacji ciekawego i bardzo ważnego tematu badawczego. W tym kontekście należy stwierdzić, że postawiony główny cel badawczy rozprawy jest jak najbardziej słuszny, zaś realizacja wyspecyfikowanych celów szczegółowych stanowi dobry plan służący dowiedzeniu sformułowanej tezy rozprawy, czyli możliwości opracowania metod i algorytmów prowadzących do poprawy efektywności obliczeniowej i energetycznej uczenia maszynowego oraz aplikacji numerycznych w środowisku wysokowydajnych systemów komputerowych.

Praca wnosi istotny wkład w obszar badań nad energooszczędnymi aplikacjami numerycznymi oraz adaptacyjnymi metodami przetwarzania zapytań zliczających w wysokowydajnych systemach komputerowych, oferując zarówno nowe modele teoretyczne, jak i praktyczne narzędzia programistyczne potwierdzone eksperymentalnie w drodze rzetelnie przeprowadzonych badań empirycznych.

Do najważniejszych oryginalnych wyników, które zostały przedstawione w rozprawie, zaliczyć należy następujące:

1. Opracowanie metody redukcji zużycia energii w aplikacjach zrównoleglanych w oparciu o model równoległości danych, opartej na zarządzaniu częstotliwością grup rdzeni w celu kompensacji nierównomiernej dystrybucji obciążeń, pozwalającej na obniżenie poboru energii bez utraty wydajności i przewyższającej skutecznością standardowe techniki DVFS. Uzupełnieniem metody są algorytmy wyboru heterogenicznej konfiguracji częstotliwości, które przyspieszają proces poszukiwania ustawień optymalnych, wykorzystując pomiary energii lub wyłącznie analizę czasu wykonania, umożliwiając implementację w środowiskach bez dostępu do pomiarów energetycznych.
2. Zaprojektowanie oraz implementacja dwóch autorskich metod poprawy wydajności strategii realizacji zapytań zliczających, opartej na reprezentowaniu stanów zmiennych zapytania za pomocą struktur bitmapowych oraz algorytmie

przeszukiwania w głąb. Dodatkowo należy podkreślić, że oba podejścia zostały zintegrowane z istniejącą biblioteką SABNAtk, która stanowi narzędzie do efektywnej realizacji zapytań zliczających w aplikacjach uczenia maszynowego. Uzupełnieniem powyższych prac było opracowanie metody automatycznego wyboru strategii realizacji zapytań zliczających, której celem jest skrócenie czasu obsługi strumienia zapytań w warunkach zmiennych charakterystyk danych i zapytań. Zaproponowane rozwiązanie łączy zalety trzech komplementarnych strategii, to jest BV, RAD oraz CT, i wykorzystuje mechanizm regresji jako adaptacyjny model decyzyjny.

3. Zaprojektowanie i implementacja wariantu metody automatycznego doboru strategii realizacji zapytań zliczających, przystosowanej do bezpiecznego działania w środowisku wielowątkowym. Rozwiązanie opiera się na ograniczeniu zakresu współdzielonych modyfikacji danych oraz na selektywnym zastosowaniu mechanizmów synchronizacji, co eliminuje ryzyko wystąpienia „race-conditions” podczas równoległego przetwarzania. Opracowana implementacja umożliwia efektywne wykorzystanie modelu równoległości zadań, w którym zapytania zliczające są obsługiwane jako niezależne jednostki obliczeniowe wykonywane jednocześnie na wielu rdzeniach procesora, z użyciem standardowych bibliotek do programowania równoległego.
4. Opracowanie metody równoległej realizacji zapytań zliczających przeznaczoną dla architektur ccNUMA, która uwzględnia niejednorodny dostęp do pamięci wynikający z podziału systemu na wiele domen NUMA. Zaproponowane podejście poprawia lokalność danych względem rdzeni wykonawczych, ograniczając koszty dostępu do pamięci i poprawiając skalowalność obliczeń. Rozwiązanie jest niezależne od konkretnej strategii realizacji zapytań i może być integrowane z mechanizmami automatycznego wyboru strategii.

Biorąc pod uwagę wskazane wyżej osiągnięcia należy stwierdzić, że autorowi rozprawy udało się w pełni osiągnąć zamierzone cele i rozwiązać oryginalny problem. Tezę pracy należy również uznać za bezsprzecznie dowiedzioną. Trzeba również podkreślić, że rozprawa bardzo dobrze prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną autora oraz jego

umiejętność prowadzenia pracy naukowej skutkującej uzyskaniem ciekawych wyników, które można zastosować w praktyce. Na uwagę zasługuje również sprawność, z jaką autor posługuje się zarówno aparatem matematycznym i algorytmicznym, jak również zaawansowanymi technologiami informatycznymi, w tym narzędziami służącymi analizie wykonania programów na współczesnych architekturach wielordzeniowych. Wyniki zaprezentowane w niniejszej rozprawie doktorskiej spotkały się z szerokim uznaniem międzynarodowej społeczności naukowej. Zostały one przedstawione na prestiżowych, renomowanych konferencjach naukowych o zasięgu międzynarodowym. Ponadto rezultaty badań opublikowano zarówno w materiałach pokonferencyjnych, jak i w czołowych, wysoko punktowanych czasopismach naukowych. Warto również podkreślić, że wzbudziły zainteresowanie międzynarodowego środowiska badawczego (cytowania w bazie Scopus) co potwierdza ich istotny wkład w rozwój dyscypliny ITT.

Lektura rozprawy nasuwa pewne pytania, na które w treści pracy nie udzielono jednoznacznych odpowiedzi, co stwarza przestrzeń do dalszej dyskusji naukowej oraz pogłębionych badań nad poruszaną problematyką.

- Q1** Materiał przedstawiony w rozdziale drugim oraz treści kolejnych rozdziałów 3–7 należy traktować jako dwie odrębne części, których wspólnym motywem jest dostosowanie wykonania obliczeń do współczesnych wysokowydajnych systemów komputerowych. Czy możliwe jest bezpośrednio zastosowanie wyników opisanych w rozdziale drugim do poprawienia efektywności energetycznej równoległych implementacji algorytmów opisanych w drugiej części pracy?
- Q2** W podrozdziale 8.2 wskazano (całkiem słusznie) celowość dalszych prac nad adaptacją algorytmów na środowiska GPU oraz RISC-V. Należy zapytać, czy możliwe jest przeniesienie opracowanych implementacji na środowisko klastrów węzłów *multicore* komunikujących się z użyciem interfejsów MPI lub SHMEM? Jakie problemy mogłyby się pojawić dla takich środowisk?

Można również wskazać na pewne drobne niedoskonałości formalne:

- N1** Rozdział drugi zyskałby na jasności, gdy opisano sposób w jaki ustawiano częstotliwość taktowania oraz odczytywano parametry istotne z punktu widzenia algorytmu opisanego w podrozdziale 2.5.2 oraz lub udostępniono kod aplikacji.
- N2** W sekcji 1.3 opisującej strukturę pracy brak opisu zawartości aneksu zajmującego strony 127–144. Aneks byłby również bardziej użyteczny, gdyby opisano w nim ogólną strukturę aplikacji, np. w postaci schematu UML.
- N3** Przyjęty styl bibliografii jest zbyt lakoniczny. Na pewno byłby bardziej użyteczny dla czytelnika, gdyby poszczególne pozycje zostały wzbogacone o numery DOI. W przypadku niektórych pozycji brakuje numerów stron.
- N4** W podrozdziale 1.2 autor podaje najpierw tezę pracy, a następnie jej cel. Wydaje się, że z uwagi na postać tezy, czytelniejszym byłoby sformułowanie tezy po przedstawionych celach. Wówczas jasne byłoby o jakie konkretnie badania chodzi.

Trzeba jednak jasno stwierdzić, że przedstawione wyżej uwagi w żaden sposób nie podważają mojej bardzo dobrej opinii o poziomie naukowym oraz sposobie prezentacji wyników zawartych w rozprawie.

5 Konkluzja

Podsumowując uwagi zawarte w recenzji, stwierdzam, że rozprawa doktorska bardzo dobrze prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną doktoranta oraz potwierdza jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, także w zakresie potencjalnych zastosowań wyników własnych badań w sferze gospodarczej, a zatem spełnia wymogi określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. 2018, poz. 1668 z późn. zm.). Wnoszę zatem o dopuszczenie mgr. inż. Pawła Bratka do publicznej obrony rozprawy doktorskiej oraz do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dyscyplinie *Informatyka techniczna i telekomunikacja*. Jednocześnie, biorąc pod uwagę znaczenie wyników zaprezentowanych w rozprawie, ich potencjał aplikacyjny oraz fakt, że

zyskały one uznanie międzynarodowej społeczności naukowej, co potwierdzają akceptacje prezentacji na prestiżowych konferencjach, publikacje w materiałach pokonferencyjnych oraz wiodących czasopismach naukowych, wnoszą o wyróżnienie przedmiotowej rozprawy doktorskiej.



/Przemysław Stpicyński/