

dr hab. Jakub Spiechowicz, prof. UŚ
Uniwersytet Śląski w Katowicach
Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych
Instytut Fizyki im. Augusta Chełkowskiego
ul. 75 Pułku Piechoty 1A
41-500 Chorzów
e-mail: jakub.spiechowicz@us.edu.pl

Chorzów, 16 luty 2024 r.

Recenzja dysertacji doktorskiej mgr. Konrada Jałowieckiego pt. „Validation and benchmarking of quantum annealing technology”

Przedstawioną mi do recenzji pracę doktorską Pan mgr Konrad Jałowiecki przygotował w Instytucie Informatyki Teoretycznej i Stosowanej Polskiej Akademii Nauk pod kierunkiem promotora dra hab. Bartłomieja Gardasa przy pomocniczym udziale dra hab. inż. Łukasza Paweli. Ma ona dopuszczoną przez ustawę formę rozszerzonego przewodnika po zbiorze opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, na który składają się następujące publikacje:

- D1 K. Jałowiecki, A. Więckowski, P. Gawron and B. Gardas
Parallel in time dynamics with quantum annealers,
Scientific Reports 10, 13534 (2020)
- D2 M. M. Rams, M. Mohseni, D. Eppens, K. Jałowiecki and B. Gardas,
Approximate optimization, sampling and spin-glass droplet discovery with tensor networks,
Physical Review E 104 , 025308 (2021)
- D3 K. Jałowiecki, M. M. Rams and B. Gardas,
Brute-forcing spin-glass problems with CUDA,
Computer Physics Communications 260, 107728 (2021)
- D4 K. Domino, M. Koniorczyk, K. Krawiec, K. Jałowiecki, S. Deffner and B. Gardas,
Quantum annealing in the NISQ era: railway conflict management,
Entropy 25, 191 (2023)
- D5 K. Jałowiecki and Ł. Paweła,
Omnisolver: An extensible interface to Ising spin-glass and QUBO solvers,
SoftwareX 24, 101559 (2023)

Warto zauważyć, że w ponad połowie z nich doktorant jest pierwszym autorem. Wszystkie publikacje ukazały się w renomowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym, w tym wydawanych przez Amerykańskie Towarzystwo Fizyczne. Wspólnym mianownikiem wyżej wymienionych prac jest problem walidacji i testowania współczesnej generacji wyżarzaczy

kwantowych firmy D-Wave. Należy podkreślić, że oprócz powyższych publikacji wchodzących w skład dysertacji doktorskiej, Pan mgr Jałowiecki jest współautorem 6 artykułów naukowych. Sumarycznie, w swoim naukowym portfolio według bazy Scopus doktorant posiada 11 pozycji cytowanych łącznie 44 razy, przy indeksie Hirscha wynoszącym 4. W związku z powyższym można zaryzykować stwierdzenie, że na tym etapie rozwoju naukowego dorobek Pana mgr. Jałowieckiego jest ponad przeciętny.

Zasadnicza część dysertacji doktorskiej składa się ze 102 stron tekstu podzielonego na 7 rozdziałów, z których ostatnie cztery (łącznie 64 strony) wprowadzają czytelnika do problematyki publikacji D1-D4 oraz nakreślają ich najważniejsze rezultaty. Pierwsze trzy rozdziały (łącznie 38 stron) stanowią wstęp, w którym autor prezentuje model Isinga i jego związek z problemem optymalizacji binarnej oraz zaznajamia czytelnika z koncepcją adiabatycznych obliczeń kwantowych, w tym w szczególności z kwantowym wyżarzaniem, a także omawia architekturę wykorzystanych przez niego komputerów D-Wave i procesorów graficznych. Biorąc pod uwagę fakt opatrzenia części dotyczącej opublikowanych prac rzeczowym wstępem, należy stwierdzić, że dysertacja Pana mgr. Jałowieckiego nie ma formy ani klasycznej rozprawy, ani standardowego przewodnika, chociaż bliżej jej do tego drugiego. Wykaz literatury zawiera 102 pozycje i został starannie przygotowany.

W drugim rozdziale autor definiuje model Isinga oraz przedstawia zagadnienie jego stanu podstawowego. Następnie w jego kontekście dyskutuje problem złożoności obliczeniowej algorytmów komputerowych, aby później wymienić te ostatnie służące właśnie do wyznaczenia stanu podstawowego. Rozdział kończy omówienie korespondencji pomiędzy modelem Isinga, a optymalizacją binarną.

Rozdział trzeci jest poświęcony w całości technicznemu aspektowi technologii wykorzystanych w toku przeprowadzonych badań. W pierwszej części dotyczy on kwantowych wyżarzaczy firmy D-Wave. Autor w szczególności prezentuje ewolucję topologii ich produktów, zaczynając od pierwotnej wersji Chimera, aż po typ Zephyr zastosowany w nadchodzącej generacji wyżarzaczy. Stopień skomplikowania tej ostatniej, w połączeniu z koniecznością przeprowadzenia dodatkowego jej mapowania wynikającego z fizycznych defektów produktu, uświadamia czytelnikowi, że w chwili obecnej programowanie kwantowych wyżarzaczy firmy D-Wave z pewnością nie należy do najłatwiejszych zadań. W drugiej części rozdziału autor omawia opracowaną przez firmę NVIDIA architekturę CUDA procesorów wielordzeniowych (graficznych), która umożliwia rozwiązywanie wielu problemów numerycznych w sposób znacząco bardziej wydajny niż ma to miejsce w przypadku tradycyjnych procesorów ogólnego zastosowania. Trzeba w tym miejscu podkreślić, że obecnie ta architektura święci triumf z powodu bardzo intensywnego wykorzystywania na potrzeby uczenia maszynowego.

W czwartym rozdziale autor rozpoczyna dyskusję należących do zbioru opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych powstałych z jego udziałem. Rozdział zawiera analizę nieco prowokacyjnego problemu równoległej w czasie symulacji ewolucji układu dynamicznego. Odejście od sekwencyjności jest możliwe kosztem rozszerzenia przestrzeni Hilberta badanego układu, w taki sposób, aby w dodatkowa podprzestrzeń zawierała informację dotyczącą chronologii jego stanów. W dalszej części rozdziału autor wykazuje, że taka forma tego absolutnie fundamentalnego problemu naukowego nadaje się do implementacji na kwantowym wyżarzaczu firmy D-Wave. W rolę układu dynamicznego w takim przypadku wciela się dwupoziomowy układ dany przez odpowiedni operator spinu. W pracy D1 autorzy przeprowadzili walidację tej metody w zależności od precyzji obliczeń, czasu trwania symulacji i procesu wyżarzania. Okazuje się, że istnieją specyficzne reżimy, w których obecna generacja kwantowego wyżarzacza poprawnie

przewiduje ewolucję układu, ale w ogólności nie jest to możliwe. Rozdział kończy krótka dyskusja pochodzenia błędów stwierdzonych w wynikach uzyskanych przy użyciu komputera D-Wave.

Rozdział piąty jest poświęcony problemowi poszukiwania stanu podstawowego modelu Isinga przy pomocy sieci tensorowych. Metoda polega na reprezentowaniu rozkładu Gibbsa dla badanego układu w formie odpowiedniej sieci, a następnie jej przeszukiwaniu w celu znalezienia najbardziej prawdopodobnego stanu. To ostatnie odbywa się zgodnie z filozofią dziel i rządź. W pracy D2 autorzy przetestowali zaproponowany algorytm zarówno pod kątem czasu jego wykonania jak również jakości generowanych wyników. W tym celu posłużyli się specjalnie przygotowanymi realizacjami modelu, z którymi klasyczne metody poszukiwania stanu podstawowego miewają problemy. Rezultaty porównali z działaniem kwantowego wyżarzacza D-Wave. Algorytm bazujący na sieciach tensorowych jako jedyny był w stanie wyznaczyć stan podstawowy układu we wszystkich przypadkach, ale z drugiej strony zdarzały się sytuacje, w których komputer D-Wave robił to wyraźnie szybciej jednakże kosztem dokładności jego wskazania.

W rozdziale szóstym autor szczegółowo omawia implementację na procesory graficzne metody wyszukiwania wyczerpującego stanu podstawowego modelu Isinga, która jest treścią publikacji D3. Wybór tego koncepcyjnie najprostszego algorytmu jest podyktowany faktem jego trywialnego paralelizmu, dzięki któremu korzyść z zastosowania właśnie takiej masywnie równoległej architektury jest maksymalna. Podstawową zaletą metody wyszukiwania wyczerpującego stanu podstawowego jest gwarancja jej sukcesu w zamian za konieczność istotnego ograniczenia rozmiaru układu. Z tego powodu problem jej optymalnej implementacji ma duże znaczenie praktyczne dla walidacji i testowania nowych algorytmów rozwiązywania modelu Isinga.

Rozdział siódmy prezentuje dyskusję aplikacji wcześniej wprowadzonych metod w kontekście zarządzania ruchem kolejowym pociągów PKP Polskich Linii Kolejowych na trasach Nidzica – Olsztynek oraz Goleszów – Wisła Uzdrowisko. Szczególnie interesujące jest wykorzystanie do tego celu kwantowego wyżarzacza D-Wave, które zostało przeanalizowane w publikacji D4. Autorzy wykazali, że ówczesna generacja kwantowych wyżarzaczy nie była w stanie wygenerować optymalnego rozwiązania tego problemu. Jednakże w rozdziale siódmym autor przedstawia również analogiczne wyniki otrzymane dla nowszego wcielenia komputera D-Wave, które potrafiło znaleźć optymalne rozwiązanie studiowanego zagadnienia. Zasadniczą część dysertacji doktorskiej kończy krótkie podsumowanie, które powinno być wyodrębnione w spisie treści i w którym autor słusznie wskazuje na szczególną rolę możliwości symulacji układów kwantowych jako weryfikatora komputerów kwantowych.

W całościowej ocenie przedstawiona mi do recenzji rozprawa w formie rozszerzonego przewodnika po zbiorze opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych we właściwy sposób wprowadza czytelnika w problematykę badań uprawianych przez doktoranta. Otrzymane wyniki uważam za interesujące i istotne dla dyscypliny. Niewielkim mankamentem dysertacji jest jej oszczędne podsumowanie, w którym autor nie analizuje roli uzyskanych rezultatów w szerszym kontekście obecnych prototypów komputerów kwantowych i ich zastosowań oraz nie wytycza przyszłych kierunków badań. Sądzę, że np. dyskusja *quo vadis* kwantowe wyżarzanie zwłaszcza w kontekście zataczającego coraz szersze kręgi uczenia maszynowego byłaby interesującym zwieńczeniem pracy.

Podsumowując, dysertację doktorską autorstwa Pana mgr. Konrada Jałowieckiego pt. „Validation and benchmarking of quantum annealing technology” oceniam pozytywnie. Uważam, że z naddatkiem spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z ustawą Prawo o Szkolnictwie Wyższym z dnia 20 lipca 2018 r. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie

Pana mgr. Konrada Jałowieckiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Jednocześnie biorąc pod uwagę ponadprzeciętną aktywność doktoranta przejawiającą się w jego dorobku naukowym oraz kompleksowe podejście do zagadnienia rozważanego w dysertacji wnioskuję o wyróżnienie przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej.

A handwritten signature in blue ink, reading "Jakub Spiechowicz". The signature is written in a cursive style with a small flourish at the end.

Jakub Spiechowicz