

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Tomasza Pecyny

zatytułowanej:

Application of quantum computing approaches for solving optimization problems

1. Problem badawczy i jego znaczenie

Tematem pracy, zgodnie z tytułem, jest zastosowanie obliczeń kwantowych do rozwiązywania problemów optymalizacyjnych. Jest to temat ważny i aktualny, gdyż w świetle obecnego stanu wiedzy komputery kwantowe mają szansę na osiągnięcie praktycznej wydajności właśnie z zakresie zagadnień optymalizacji. Z jednej strony potrzeba jest więc prac o charakterze bardziej teoretycznym, dotyczącym na przykład sposobów reprezentacji problemów w taki sposób, aby móc efektywnie wykorzystać obecne architektury kwantowe, a z drugiej strony ważne są prace bardziej praktyczne i wdrożeniowe, demonstrujące w jaki sposób użyć optymalizacji kwantowej do konkretnych problemów z dziedziny nauki i techniki. Przedstawiona rozprawa dobrze wpisuje się w te trendy, poruszając zarówno teoretyczne jak i praktyczne elementy optymalizacji kwantowej, w tym dostarczając narzędzi do uruchamiania tego typu problemów na współczesnych architekturach kwantowych.

2. Wkład autora

Najważniejszy wkład badawczy Autora rozprawy polega na opracowaniu rozwiązań dla zestawu wybranych problemów optymalizacyjnych przy użyciu komputerów kwantowych. Problemy te opisuje się przez Hamiltonian, reprezentujący energię układu, która jest minimalizowana przez układ kwantowy. Wymienić tu należy następujące rozwiązania opracowane przez Doktoranta:

- Zastosowanie metody Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA) dla problemu ładowania pojazdów elektrycznych na autostradzie oraz problemu taktycznej dekonfliktacji statków powietrznych. Wymagało to opracowania reprezentacji Hamiltonianowej służącej do rozwiązywania problemów przez algorytmy kwantowe, a następnie wykonanie eksperymentów na aktualnie dostępnych komputerach kwantowych, takich jak procesor *ibmq_toronto* udostępniany przez IBM. Należy zaznaczyć, że obecnie dostępne komputery kwantowe pozwalają na rozwiązywanie problemów o bardzo niewielkich rozmiarach, rzędu kilku pojazdów elektrycznych czy statków powietrznych i ich manewrów. Dlatego ważne jest badanie nowych podejść do formułowania i rozwiązywania problemów. Tu autor pracy zaproponował odpowiednie metody doboru głębokości algorytmu QAOA i porównał wyniki w zależności od

tego parametru, a także sprawdził jaki wpływ na wydajność ma sformułowanie Hamiltonianu kosztu, gdy zmienia się struktura problemu przy stałym rozmiarze problemu.

- Połączenie algorytmu QAOA z klasycznymi zasobami komputerów dużej mocy (HPC), na przykładzie problemu *job shop scheduling problem* (JSSP), będącego klasycznym zagadnieniem w teorii szeregowania. Komputery HPC mogą być zastosowane do znalezienia optymalnych parametrów wariacyjnych dla danego problemu, co, jak pokazano w pracy, może kilkukrotnie skrócić czas optymalizacji.
- Wykorzystanie optymalizacji kwantowej do poszukiwania odpowiednich parametrów wariacyjnych – przeprowadzono eksperymenty z użyciem symulatorów kwantowych i algorytmu FALQON, pokazujące, że da się uzyskać lepsze rozwiązania w porównaniu do zwykłego algorytmu QAOA.
- Redukcja lub poszerzenie przestrzeni poszukiwań – w pracy pokazano, jak poprzez uwzględnienie dodatkowych ograniczeń w Hamiltonianie, można w niektórych przypadkach zwiększyć prawdopodobieństwo znalezienia dopuszczalnego rozwiązania. Co ciekawsze, pokazano również, że złagodzenie (relaksacja) niektórych ograniczeń, a co za tym idzie uproszczenie Hamiltonianu, może również poprawić wydajność rozwiązań.

Oprócz osiągnięć badawczych, podkreślić należy również praktyczny aspekt wykonanych przez Autora prac. Po pierwsze, pomimo wciąż bardzo niewielkich rozmiarów problemów jakie aktualnie potrafią rozwiązywać komputery kwantowe, Doktorant podjął wysiłek zastosowania ich do takich praktycznych problemów jak zarządzanie konfliktami w przestrzeni powietrznej czy ładowanie pojazdów elektrycznych na autostradach, a więc nie tylko syntetycznych benchmarków, lecz praktycznych zagadnień. Na uwagę zasługuje także próba wykorzystania w eksperymentach rzeczywistych danych, takich jak choćby dane na temat autostrady A4 w Polsce. To pokazuje, że komputery kwantowe mają potencjał do rozwiązywania rzeczywistych problemów optymalizacyjnych, przy czym oczywiście wciąż pozostaje do rozwiązania kwestia skali. Po drugie, Autor opracował zestaw praktycznych narzędzi ułatwiających uruchamianie tych problemów na komputerach kwantowych, symulatorach oraz na infrastrukturze HPC. Narzędzia te zostały zintegrowane z infrastrukturą obliczeniową Poznańskiego Centrum Superkomputerowo Sieciowego (PCSS) w ramach projektu EuroHPC-PL bazując na rozwijanym w PCSS środowisku QCG. Powstałe zestawy narzędzi, bibliotek i specjalizowanych interfejsów graficznych dostosowanych do konkretnych zastosowań mogą stanowić krok w stronę ułatwiania dostępności komputerów kwantowych.

Dodatkowo, należy zwrócić uwagę, że wyniki przedstawione w Rozprawie zostały opublikowane w 5 artykułach w czasopismach oraz w recenzowanych materiałach konferencyjnych, w tym w czasopiśmie *European Journal of Operational Research* oraz na konferencji *International Conference on Computational Science (ICCS)*, co potwierdza dobrą jakość wyników naukowych.

3. Poprawność

Badania opisane w pracy zrealizowane są poprawnie od strony metodologicznej, bazują na znajomości aktualnego stanu wiedzy oraz na standardowych algorytmach optymalizacji kwantowej (np. QAOA). Zastosowano odpowiednią dla komputerów kwantowych metodologię reprezentacji problemów w postaci Hamiltonianów (minimalizacja energii układu), co wymaga opanowania pewnej „sztuki”. Na uwagę zasługują ilustracyjne przykłady, dobrze uzupełniające matematyczny opis problemu. Eksperymenty zostały wykonane na rzeczywistych bramkowych komputerach kwantowych z firmy

IBM, będącej liderem w tych technologiach, a także z użyciem symulatorów oraz infrastruktury HPC, co jest podejściem właściwym i stosowanym obecnie dla tego typu zagadnień. Eksperymenty zaplanowane zostały starannie, choć na pewno można było przetestować większy zakres parametrów lub klas problemów. Analiza danych wykonana jest prawidłowo, przedstawione tabele i wykresy dobrze ilustrują otrzymane wyniki. Również opracowane rozwiązania praktyczne zostały wdrożone w platformie obliczeń kwantowych PCSS, co świadczy w pewnym stopniu o wysokiej jakości powstałego oprogramowania.

Pewną słabością pracy jest ograniczenie się do zastosowania istniejących metod i algorytmów optymalizacji kwantowej, takich jak QAOA, choć z drugiej strony jest to jak najbardziej uzasadnione aplikacyjnym charakterem pracy realizowanej w ramach doktoratu wdrożeniowego, gdzie głównym celem było zastosowanie tych metod do nowych, praktycznych problemów. Z kolei w analizie wyników przedstawionych w publikacjach zwraca uwagę brak informacji o błędach pomiarowych – a powinna ona być istotna, biorąc pod uwagę nieunikniony niedeterminizm wynikający z mechaniki kwantowej. W przypadku części wdrożeniowej zabrakło informacji o użytkownikach końcowych systemu – czy zostały przeprowadzone np. testy akceptacyjne wdrożonego oprogramowania lub zebrane opinie wśród użytkowników. Wymienione słabości nie wpływają na pozytywną ocenę Rozprawy i mogą być podstawą do dalszych kierunków prac badawczych.

4. Wiedza kandydata

Praca jest bardzo dobrze osadzona względem aktualnego stanu wiedzy w dziedzinie optymalizacji kwantowej. W każdym z artykułów przedstawiona jest analiza istniejących rozwiązań, na których Autor bazuje własne. Rozwiązania przedstawione w pracy, a także udział Autora w pracach zespołu zajmującego się obliczeniami kwantowymi związanego z PCSS świadczy o bardzo dobrym rozeznaniu Doktoranta w tej bardzo młodej, ale dynamicznie rozwijającej się dziedzinie informatyki, jaką są obliczenia kwantowe. Na uwagę zasługuje połączenie wiedzy informatycznej, zarówno tej teoretycznej związanej z teorią szeregowania czy złożonością obliczeniową, z elementami inżynierii oprogramowania i wykorzystaniem aktualnych infrastruktur obliczeniowych, w tym bramkowych komputerów kwantowych (IBM) oraz superkomputerów (HPC). Znajomość aktualnego stanu wiedzy poświadczona jest też przez bogatą bibliografię (28 pozycji w pierwszym artykule, ponad 60 w kolejnym). Wiedza Doktoranta w dziedzinie informatyki klasycznej oraz obliczeń kwantowych jest z pewnością głęboka, co jest szczególnie ważne, gdyż w opinii recenzenta jest to jedna z pierwszych prac doktorskich w Polsce dotycząca obliczeń kwantowych w dyscyplinie Informatyka techniczna i telekomunikacja.

5. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę opinie zaprezentowane w poprzednich punktach i wymagania zdefiniowane przez art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późniejszymi zmianami)¹ moja ocena rozprawy pod względem trzech podstawowych kryteriów jest następująca:

¹ <http://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20190000276>

A. Czy rozprawa zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego? (wybierz jedną opcję stawiając znak X)

☒	☐	☐	☐	☐
Zdecydowanie TAK	Raczej TAK	Trudno powiedzieć	Raczej NIE	Zdecydowanie NIE

B. Czy po przeczytaniu rozprawy zgadzasz się, że kandydat posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie Informatyka techniczna i telekomunikacja?

☒	☐	☐	☐	☐
Zdecydowanie TAK	Raczej TAK	Trudno powiedzieć	Raczej NIE	Zdecydowanie NIE

C. Czy kandydat posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej?

☒	☐	☐	☐	☐
Zdecydowanie TAK	Raczej TAK	Trudno powiedzieć	Raczej NIE	Zdecydowanie NIE

Ponadto, biorąc pod uwagę nowatorski temat rozprawy, połączenie elementów teoretycznych z praktycznymi oraz dorobek publikacyjny Autora, rekomenduję wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

M. Malawski

Podpis