

Recenzja rozprawy doktorskiej

Tomasza Pecyny

zatytułowanej:

Application of Quantum Computing Approaches for Solving Optimization Problems

1. Wprowadzenie

Niniejsza recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Tomasza Pecyny, została wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Informatyki i Telekomunikacji Politechniki Poznańskiej Pana dr. hab. inż. Mikołaja Morzego, prof. PP (Pismo nr DIiT-63-28/2024 z dnia 27 listopada 2024 r.). Promotorami niniejszej rozprawy jest Pan dr hab. inż. Rafał Różycki, prof. PP, a promotorem pomocniczym Pan dr hab. inż. Krzysztof Kurowski. Praca doktorska napisana jest w języku angielskim. Przedłożona do recenzji rozprawa była realizowana w ramach programu doktoratu wdrożeniowego we współpracy z Poznańskim Centrum Superkomputerowo-Sieciowym.

Recenzowana rozprawa liczy 122 stron i składa się ze wstępu, trzech rozdziałów o numerach od 2 do 4, podsumowania, bibliografii, manuskryptów 4 publikacji na których oparta jest sama dysertacja, oraz rozszerzonego streszczenia w języku polskim. Licząca 36 pozycji bibliografia (nie uwzględniając bibliografii pięciu włączonych publikacji) zawiera najistotniejsze pozycje z zakresu teorii obliczeń kwantowych.

2. Problem badawczy i jego znaczenie

Rozprawa doktorska mgra inż. Tomasza Pecyny poświęcona jest zagadnieniom optymalizacji we współczesnych systemach obliczeń kwantowych NISQ (*Noisy Intermediate-Scale Quantum*). Jest to niewątpliwie ważny problem naukowy, a wykorzystanie realnych maszyn kwantowych czyni go dodatkowo atrakcyjnym dla praktyków.

3. Wkład autora

Z merytorycznego punktu widzenia w rozprawie można wyróżnić dwie części. Pierwsza to rodzaj autoreferatu, obejmującego strony od 1 do 34, streszczająca wyniki pięciu opublikowanych prac. Druga część to sama treść (reprinty) owych pięciu publikacji współautorskich:

- [P1] Różycki, R., Józefowska, J., Kurowski, K., Lemański, T., Pecyna, T., Subocz, M., Waligóra, A quantum approach to the problem of charging electric cars on a motorway. *Energies*. 16, 442 (2022). <https://doi.org/10.3390/en16010442>.
- [P2] Kurowski, K., Pecyna, T., Słysz, M., Różycki, R., Waligóra, G., Węglarz, J.: Application of quantum approximate optimization algorithm to job shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*. 310, 518–528 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.03.013>.

- [P3] Pecyna, T., Kurowski, K., Różycki, R., Waligóra, G., Węglarz, J.: Quantum variational algorithms for the aircraft deconfliction problem. In: Lecture notes in computer science. pp. 307–320 (2024). https://doi.org/10.1007/978-3-031-63778-0_22.
- [P4] Pecyna, T., Różycki, R.: Improving quantum optimization algorithms by constraint relaxation. Applied Sciences. 14, 8099 (2024). <https://doi.org/10.3390/app14188099>.
- [P5] Pecyna, T., Siera, D., Bosak, B.: QCG-QuantumLauncher: a modular tool for quantum scenarios. Conference materials from 15th International Conference on Parallel Processing & Applied Mathematics, Ostrava, Czech Republic, September 8-11, 2024

Prace te zostały opublikowane w 3 czasopismach posiadających Impact Factor oraz materiałach dwóch konferencji o zasięgu międzynarodowym (ICCS oraz PPAM). Wkład doktoranta został precyzyjnie sformułowany dla każdej z prac i wskazuje, że dla **każdej** z nich pan Tomasz Pecyna był współtwórcą idei podejścia kwantowego, wykonał implementację algorytmów i eksperymenty obliczeniowe oraz współtworzył sam tekst publikacji. Są to kluczowe elementy i pozwalają ocenić opublikowane wyniki jako osiągnięcia doktoranta.

Za najważniejsze wyniki zamieszczone w rozprawie uważam:

1. Ocenę efektywności algorytmu QAOA w problemach kombinatorycznych. Sformułowanie nowych równań Hamiltonianów, m.in. dla (1) problemu gniazdowego szeregowania zadań w odniesieniu do bramkowych komputerów kwantowych, (2) problemu ładowania pojazdów elektrycznych (EMVCP), oraz (3) problemu dekonfliktacji statków powietrznych.
2. Połączenie algorytmu QAOA z klasycznymi zasobami superkomputerowymi.
3. Opracowanie metod czystej optymalizacji kwantowej – tj. wykorzystującej jedynie obliczenia kwantowe.
4. Redukcję przestrzeni poszukiwań poprzez dodanie ograniczeń w Hamiltonianie miksującym algorytmu QAOA Ansatz.
5. Zmniejszenie liczby ograniczeń w formułowaniu Hamiltonianów – uwzględnienie rozwiązań niedopuszczalnych podczas procesu poszukiwań optimum.

4. Poprawność

Rozprawa, w tym 5 prac na których jest oparta, została napisana poprawnie, jednak Autor nie ustrzegł się pewnych niedociągnięć:

1. W pracy [P1] na stronie 15 na początku rozdziału „5. Results” wzmiankowane jest użycie algorytmu QAOA, natomiast z kontekstu (i wykresu 9) wynika, że rzecz dotyczy kwantowego wyżarzania. Świadczą o tym np. parametry czasowe wymienione pod wykresem 9 (QPU_SAMPLING_TIME, QPU_ANNEAL_TIME_PER_SAMPLE, etc.) charakterystyczne dla kwantowego wyżarzacza D-Wave.
2. W pracy [P1] na stronie 16 Autor (Autorzy) pisze: „The D-wave company provides another way of solution computation using hybrid (both quantum and classical computing). The constraint quadratic model (CQM) allows for defining inequality constraints, as well as many other utilities. What is more, this model type is required to use hybrid computing in which the problem is first divided into sub-problems and only then solved, piece by piece, on a purely quantum machine.” Z dokumentacji D-Wave¹ wynika, że model LeapHybridSolver do którego odnosi się

¹ C. McGeoch, P. Farre, W. Bernoudy, Hybrid Solver Service Advantage: Technology Update, Technical Report, 2020, https://www.dwavesys.com/media/m2xbmlhs/14-1048a-a_d-wave_hybrid_solver_service_plus_advantage_technology_update.pdf.

powyższy fragment używa w pewnym stopniu QPU do „sterowania” procesem poszukiwań, ale jednak głównie klasycznych heurystyk uruchamianych na CPU i GPU (cytat z tego raportu technicznego firmy D-Wave: „QPU is able to exploit limited information about the full problem, and to generate useful suggestions about new promising regions of the search space to explore”). Oczywiście ma to negatywny wydźwięk ze względu na reklamowanie przez firmę D-Wave swojego narzędzia jako kwantowego (w domyśle: w pełni kwantowego), natomiast faktycznie pod względem uzyskanych rezultatów pozwala znacznie poprawić wyniki czystego modelu BQM. W tym kontekście stwierdzenie z pracy [P1] odnośnie rozwiązywania podproblemów przez czyste użycie maszyny kwantowej uważam za dyskusyjne. Inna rzecz, że D-Wave nie do końca jest otwarty w kwestii narzędzi jakich używa, pisząc o klasycznych solverach, ale nie wiadomo jakich.

3. Notacja jest momentami myląca. Przykładowo symbolem H określony jest Hamiltonian we wzorze (2.11) na stronie 8 oraz operator Hermita we wzorze (2.6) na stronie 6. A także przestrzeń Hilberta wyżej na stronie 6 – choć bez kursywy, i bramkę Hadamarda na stronie 5. Co prawda wszystko to są „naturalne” notacje, ale w takim nagromadzeniu dobrze byłoby je jednak rozróżniać. Uważny czytelnik zorientuje się co aktualnie symbol H lub H wyraża, jednak precyzja naukowa wymaga by nie trzeba się było domyślać. W tym kontekście zapisy typu \sum_m (np. na stronie 12) już tak nie przeszkadzają, choć zakres sumowania niekoniecznie zawsze jest oczywisty dla czytelnika.

Wymienione powyżej uwagi merytoryczne i redakcyjne nie mają zasadniczego wpływu na wagę i jakość przedstawionych w rozprawie wyników i nie wpływają też w znaczący sposób na ogólną pozytywną jej ocenę. Autor zastosował metody badawcze właściwie dobrane do problematyki optymalizacji kwantowej, a dobór cytowanej literatury nie budzi zastrzeżeń.

Jedną z głównych tez pracy było stwierdzenie, że możliwe jest opracowanie efektywnych metod optymalizacji przy użyciu dostępnych współcześnie komputerów kwantowych. Cel ten został osiągnięty poprzez zaproponowanie metod formułowania Hamiltonianów wykorzystywanych w algorytmach QAOA (a także w wyżarzaczach kwantowych), redukcji rozmiarów przestrzeni rozwiązań oraz zmniejszeniu liczby ograniczeń (dopuszczenia w procesie poszukiwać rozwiązań niedopuszczalnych).

Wobec powyższych stwierdzam, że recenzowana praca ma charakter naukowy i może być przedmiotem rozprawy doktorskiej. Wyniki uzyskane przez Autora w istotny sposób wzbogacają istniejący stan wiedzy. Należy więc uznać, że podjęcie zawartego w tezach pracy problemu badawczego jest w pełni uzasadnione.

5. Wiedza kandydata

Zarówno część rozprawy dotycząca omówienia stanu wiedzy, jak i analogiczne części poszczególnych pięciu publikacji wchodzących w skład rozprawy potwierdzają bardzo solidny stan wiedzy kandydata w zakresie Informatyki Technicznej i Telekomunikacji w obszarze obliczeń kwantowych. Są one sformułowane przy pomocy adekwatnych narzędzi matematycznych i prezentują wysoki poziom merytoryczny doktoranta w zakresie podstaw matematycznych obliczeń kwantowych, co powszechnie uważane jest za tzw. „wysoki próg wejścia” w tej subdyscyplinie.

6. Inne uwagi

Uwagi do rozszerzonego streszczenia w języku polskim:

1. s. 116 „Podobnie jak w sztucznej inteligencji, gdzie minimalizowana jest funkcja

kosztu, w optymalizacji kwantowej minimalizowana jest energia.” – niezręczność; „w problemach sztucznej inteligencji”, generalnie zdanie dotyczy raczej optymalizacji, dla problemów klasyfikacji, wspomaganie podejmowania decyzji, predykcji, pojawia się na ogół element optymalizacji ale nie jako wiodący element metody, a raczej moduł strojenia parametrów, np. sieci neuronowej,

2. s. 116 „Wyniki pokazują” – antropomorfizm,
3. s. 117 „włączenie twardego ograniczenia mówiącego, że” – antropomorfizm,
4. s. 117 „istnieje tylko 5 wykonalnych rozwiązań” – dopuszczalnych,
5. s. 121 „przedmiotowej” – przedmiotowej,
6. s. 121 „praca ta wnosi istotny, spójny i uporządkowany wkład, zwłaszcza w zakresie wiedzy naukowej, narzędzi wspierających użytkowników oraz aplikacji do optymalizacji kwantowej” – niezręczność; lepiej ocenę pozostawić czytelnikom,
7. s. 121 „okazało się przewyższać tradycyjną metodę QUBO stosowaną na komputerach realizujących kwantowe wyżarzanie” – QUBO nie jest *metodą* tylko *formą* reprezentacji zadania optymalizacji; metodą jest kwantowe wyżarzanie, czyli rodzaj sprzętowej metaheurystyki.

7. 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)² moja ocena rozprawy pod względem trzech podstawowych kryteriów jest następująca:

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

<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
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?

<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zdecydowanie TAK	Raczej TAK	Trudno powiedzieć	Raczej NIE	Zdecydowanie NIE

C. Czy kandydat posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej?

<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zdecydowanie TAK	Raczej TAK	Trudno powiedzieć	Raczej NIE	Zdecydowanie NIE



Podpis

² <http://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20190000276>