

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Tomasza Pecyny

zatytułowanej:

*“Application of quantum computing approaches
for solving optimization problems”*

Recenzję przygotowałem w odpowiedzi na pismo Dziekana Wydziału Informatyki i Telekomunikacji Politechniki Poznańskiej z dnia 27 listopada 2024 roku (DIiT-63-28/2024) informującego mnie o powołaniu mojej osoby na recenzenta w przewodzie doktorskim mgr. inż. Tomasza Pecyny.

Rozprawa doktorska została przedłożona jako zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych (odpowiednio do zapisów Art. 187 ust. 3 obowiązującej Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce). Zbiór ten tworzą następujące artykuły naukowe:

- [P1] Różycki, R., Józefowska, J., Kurowski, K., Lemański, T., **Pecyna, T.**, Subocz, M., Waligóra, G.: A quantum approach to the problem of charging electric cars on a motorway. **Energies**. 16, 442 (2022). <https://doi.org/10.3390/en16010442>.
Liczba punktów MNiSW: 140; **Impact Factor**: 3.0 (2023)
- [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>.
Liczba punktów MNiSW: 140; **Impact Factor**: 6.0
- [P3] **Pecyna, T.**, Kurowski, K., Różycki, R., Waligóra, G., Węglarz, J.: Quantum variational algorithms for the aircraft deconfliction problem. In: Franco, L., de Mulatier, C., Paszynski, M., Krzhizhanovskaya, V.V., Dongarra, J.J., Sloot, P.M.A. (eds) Computational Science – ICCS 2024. ICCS 2024. Lecture Notes in Computer Science. vol 14837. Springer, pp. 307–320 (2024).
https://doi.org/10.1007/978-3-031-63778-0_22.
Liczba punktów MNiSW: 140; kategoria w bazie CORE: A
- [P4] **Pecyna, T.**, Różycki, R.: Improving quantum optimization algorithms by constraint relaxation. **Applied Sciences**. 14, 8099 (2024). <https://doi.org/10.3390/app14188099>.
Liczba punktów MNiSW: 100; **Impact Factor**: 2.7
- [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
Liczba punktów MNiSW: 20

W opracowaniu znalazły się trzy artykuły naukowe opublikowane w czasopismach naukowych oraz dwa artykuły naukowe opublikowane w materiałach konferencyjnych międzynarodowych konferencji naukowych.

W opracowaniu (dokumentacji postępowania), dla każdego z artykułów przedłożono informację wskazującą zakres prac i udział poszczególnych autorów w jego przygotowanie.

1. Problem badawczy i jego znaczenie

Rozprawa doktorska zatytułowana „*Application of quantum computing approaches for solving optimization problems*” została przygotowana w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

Tematyka rozprawy dotyczy obliczeń kwantowych, a szczególności zastosowania algorytmów kwantowych do rozwiązywania klasycznych problemów optymalizacyjnych oraz rzeczywistych, wybranych problemów optymalizacyjnych. W pracy skupiono się na analizie wybranych algorytmów kwantowych oraz ich walidacji na wybranych problemach optymalizacyjnych. Zaproponowano również nowe podejście do rozwiązywania problemu optymalizacyjnego w ujęciu kwantowym, oparte na tak zwanej relaksacji ograniczeń.

Tematyka rozprawy jest bardzo aktualna. Omawiane problemy zostały przedstawione w sposób klarowny, przystępny oraz zgodny z naukowymi standardami. Należy również podkreślić, iż mając na uwadze obecnym stan badań realizowanych w ramach informatyki kwantowej, wyniki badania przedstawione w niniejszej rozprawie doktorskiej mają znaczenie praktyczne. W ramach przeprowadzonych badań zaproponowano kilka narzędzi przeznaczonych dla użytkowników zainteresowanych zastosowaniami kwantowymi, w tym:

- dedykowane narzędzie (bibliotekę) QCG-QuantumLauncher umożliwiające rozwiązywanie problemów przy użyciu algorytmów kwantowych i realizacji różnych scenariuszy obliczeniowych na różnych architekturach kwantowych,
- dedykowane narzędzia wspomagające prowadzenie obliczeń kwantowych oraz analizę wyników zadań obliczeniowych.

2. Wkład autora

Zagadnienia dotyczące obliczeń kwantowych są bardzo aktualne w sferze badań i poszukiwania nowych technologii i rozwiązań dla celów obliczeniowych. Zdecydowana większość prac dotyczących obliczeń kwantowych ma charakter teoretyczny. Podobnie większość proponowanych algorytmów dedykowanych obliczeniom kwantowym jest przedstawiona w ujęciu koncepcyjnym, poza ciągle nielicznymi wyjątkami, które pozwalają uchwycić przewagę obliczeniową technologii kwantowej w rozwiązywaniu rzeczywistych problemów optymalizacyjnych (jak np. algorytm Grovera). Tym samym prace dotyczące obliczeń kwantowych koncentrują się albo na zrozumieniu istoty działania algorytmów kwantowych, albo formułowaniu reguł pozwalających na ujęcie problemu w sposób adekwatny dla algorytmu kwantowego, albo wreszcie na badaniach aplikacyjnych zastosowań obliczeń kwantowych do wybranych problemów.

Artykuły przedłożonego zbioru publikacji obejmują aspekt badawczy związany z poszukiwaniem i badaniem algorytmów kwantowych do rozwiązania problemów optymalizacyjnych. Szczególnej uwagi poddano algorytm QAOA. Algorytm ten podano ocenie pod kątem możliwości rozwiązania problemu

JSSP, problemu ładowania pojazdów elektrycznych oraz problemu taktycznej dekonfliktacji statków powietrznych. Rozwiązując te problemy zaproponowano i sformułowano dedykowane Hamiltoniany, czyli dedykowane reprezentacje służące rozwiązaniu problemów przez algorytmy kwantowe. Eksperymenty związane z wykorzystaniem algorytmu QAOA pozwoliły na analizę różnych strategii interpolacyjnych dla parametrów wynikowych związanych z wyznaczaniem rozwiązań. Przebadano również możliwości wyznaczania optymalnych parametrów wariacyjnych dla problemu JSSP. Badania pozwoliły zaobserwować szereg prawidłowości związanych z optymalizacją czasu szeregowania. Poddano także ocenie alternatywne do QAOA algorytmy, w tym algorytm FALQON, oraz rozwiązania poprawiające wyniki w optymalizacji kwantowej, w tym oparte na tak zwanych twardych ograniczeniach w Hamiltonianie miksującym. W tym ostatnim przypadku rozwiązanie wykazało korzystny efekt w przypadku problemu taktycznej dekonfliktacji statków powietrznych. Innym badanym rozwiązaniem mającym wpływ na efektywność obliczeń kwantowych było wprowadzenie ograniczeń na przestrzeń poszukiwań. Badania przeprowadzono z użyciem symulatorów kwantowych oraz rzeczywistych komputerów.

Badania nad algorytmami kwantowymi dla problemów optymalizacji kombinatorycznej na komputerach kwantowych zaowocowały opracowaniem szeregu narzędzi ułatwiających prowadzenie obliczeń oraz zbieranie i analizę uzyskanych wyników. Przykładem jest tu biblioteka QCG-QuantumLauncher oraz narzędzia takie jak QCG-Portal, czy QCG-Hampy. Opracowano także dedykowane narzędzie SkyDodge, powiązane z konkretnym rozwiązywanym problemem optymalizacyjnym, tj. problemem taktycznej dekonfliktacji statków powietrznych, i które zostało opracowane dla wsparcia kontrolerów lotu.

Istotną częścią badań Doktoranta była również ocena możliwości hybrydyzacji obliczeń kwantowych, tj. obliczeń w oparciu o hybrydowe algorytmy klasyczno-quantowe. Wnioskiem płynącym z tych badań, jest stwierdzenie, iż obliczenia szeregu parametrów inicjujących pracę algorytmów kwantowych może być wspierane przez obliczenia klasyczne i odwrotnie.

Należy zatem stwierdzić, iż choć motywatorem problemowym było rozwiązywanie problemów optymalizacji kombinatorycznej, to istotą przeprowadzonych badań było zebranie szeregu obserwacji i wniosków związanych z efektywnym prowadzeniem obliczeń kwantowych oraz opracowanie narzędzi wspierających definiowanie oraz analizę wyników obliczeń kwantowych, co rzutuje na walory rozwojowe i wdrożeniowe prowadzonych badań.

W szczególności zagadnienie badania algorytmu QAOA dla potrzeb obliczeń kwantowych oraz rozwiązania problemu JSSP było przedmiotem pracy P2. Doktorant, w tym przypadku był autorem koncepcji zastosowania algorytmu QAOA do problemu JSSP, odpowiadał za implementację algorytmu, odpowiadał też za przeprowadzenie eksperymentów oraz analizę wyników. Problem ten był także powiązany z celem badań objętych pracą P5. Niemniej jednak w tej pracy szczególną uwagę skupiono na bibliotece QCG-QuantumLauncher. Doktorant w tym przypadku był odpowiedzialny za implementację funkcjonalną biblioteki.

Aspekt oceny i formowania dedykowanych Hamiltonianów w kontekście problemu ładowania pojazdów elektrycznych został zaprezentowany w pracy P1. W tym przypadku Doktorant był odpowiedzialny za implementację zaproponowanego rozwiązania obliczeniowego, ale również przeprowadzenie eksperymentów oraz zebranie uzyskanych wyników oraz ich analizę.

Podobnie, powyższe aspekty badawcze oraz pytania implementacyjne, ale dla problemu zarządzania ruchem powietrznym były przedmiotem prac P3, P4. W tych pracach odwołano się także do dedykowanych narzędzi wspierających prowadzenie obliczeń kwantowych. W przypadku obu tych prac Doktorant jest autorem koncepcji algorytmu, przeprowadził też jego implementację, eksperymenty oraz zebrał i dokonał analizy wyników.

W przypadku każdego z artykułów naukowych Doktorant brał udział w opracowaniu ich treści.

3. Poprawność

Rozprawa doktorska, przygotowana w języku angielskim, obejmuje:

- Wstęp, w którym Doktorant zarysował problematykę badań oraz ujął syntetycznie uzyskane wyniki.
- Rozdział zatytułowany „Quantum computing”, w którym Doktorant w szczególności odniósł się do wybranych algorytmów kwantowych oraz aspektu złożoności obliczeniowej obliczeń kwantowych.
- Rozdział zatytułowany „Research work”, w którym Doktorant omówił problemy optymalizacyjne, które stanowiły przesłankę prowadzonych badań, oraz kwantowe aspekty obliczeniowe, które również stanowiły aspekt badawczy Doktoranta.
- Omówienie wyników badań, w szczególności zaproponowanych narzędzi dedykowanym prowadzeniu obliczeń kwantowych, co Doktorant zawarł w rozdziale zatytułowanym „Application results”.
- Podsumowanie.
- Bibliografię, obejmującą 34 pozycje literaturowe do których Doktorant odwoływał się we wcześniejszych rozdziałach opracowania.
- Kopie artykułów naukowych, gdy każdy z artykułów poprzedza informacja o wkładzie poszczególnych autorów w powstanie pracy.

Opracowanie obejmuje także krótkie streszczenie w języku angielskim oraz rozszerzone streszczenie w języku polskim.

Strona redakcyjna opracowania zbioru publikacji nie budzi uwag. Opracowanie jest również poprawne językowo.

Jeśli chodzi o artykuły naukowe recenzowanego zbioru publikacji, należy podkreślić, że zostały one przygotowane starannie. Wyniki zostały zaprezentowane w sposób czytelny, a opis przeprowadzonych badań i eksperymentów został przygotowany w sposób właściwy dla prowadzenia badań w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

4. Wiedza kandydata

Opracowanie zbioru publikacji zostało przygotowane w sposób właściwy dla opracowania naukowego. Zawartość poszczególnych rozdziałów – rozdziału 2, rozdziału 3 i rozdziału 4 zostały przygotowane w sposób nie budzący wątpliwości i właściwy dla podjętego problemu badań i przeprowadzonych prac badawczych i rozwojowych. Zostały one też przygotowane w sposób nie budzący wątpliwości co do wiedzy Doktoranta właściwej dla dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja. Zarówno we wprowadzeniu jak i w kolejnych rozdziałach Doktorant w sposób właściwy odwoływał się do stanu wiedzy, adekwatnej dla podjętego problemu badawczego. Przywołana literatura, zarówno w części opracowania, jak i w ramach poszczególnych artykułów naukowych jest też adekwatna i aktualna, w tym odzwierciedlająca aktualny stan wiedzy.

5. Inne uwagi¹

W przypadku prac zbiorowych dobrą praktyką jest informacja procentowa wkładu poszczególnych jej autorów w powstanie dzieła.

6. 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?

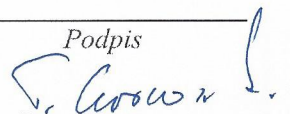
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zdecydowanie TAK	Raczej TAK	Trudno powiedzieć	Raczej NIE	Zdecydowanie NIE

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

Dokument podpisany
przez Ireneusz
Czarnowski
Data: 2025.02.04
11:49:13 CET

Podpis



¹ Opcjonalnie

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