

dr hab. inż. Marek Sawerwain, prof. UZ
Instytut Sterowania i Systemów Informatycznych
Wydział Informatyki, Elektrotechniki i Automatyki
Uniwersytet Zielonogórski
ul. Licealna 9
65-417 Zielona Góra
tel.: 68 328 2321
e-mail: M.Sawerwain@issi.uz.zgora.pl

Zielona Góra, 29.05.2025r.

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgra Filipa Maciejewskiego
*Zastosowania klasycznej losowości
na komputerach kwantowych najbliższej przyszłości*

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pt. „Zastosowania klasycznej losowości na komputerach kwantowych najbliższej przyszłości” przygotowana przez Pana mgra Filipa Maciejewskiego pod kierunkiem prof. dra hab. Zbigniewa Puchały oraz prof. dra hab. Michała Oszmańca.

1 Ogólna charakterystyka pracy i jej tematyka

Informatyka kwantowa na dynamicznie rozwijająca się dziedzina, jednakże obecnie dostępne eksperymentalne instalacje rzeczywistych systemów obliczeń kwantowych, nie oferują tak dobrych możliwości obliczeniowych jakby można było od nich oczekiwać. Jednym z powodów jest szum obecny w stosowanych rozwiązaniach fizycznych, który obniża jakość pracy całości określonego układu kwantowego. Wpływa on też na dwie zasadnicze operacje obliczeniowe jakie rozpatruje się w obliczeniach kwantowych tj. operację unitarną oraz operację pomiaru.

Ograniczone możliwości techniczne przekładają się na ograniczony dostęp do szeroko rozumianych zasobów kwantowych tj. liczby qubitów, możliwych do implementacji bramek oraz możliwości poprawnej realizacji operacji pomiaru. Zatem, opracowanie scenariuszy, które przy ograniczonych zasobach pozwolą na zmniejszenie negatywnego wpływu szumu, naturalnie są ze wszech miar istotne.

Autor recenzowanej pracy proponuje zastosowanie dodatkowych klasycznych zasobów tj. klasycznej losowości oraz dodatkowe przetwarzaniem klasyczne (pojęcie reprezentowane przez ang. post-processing) po realizacji części kwantowej, aby poprawić finalną jakość pracy danego systemu kwantowego. W pracy dotyczy to głównie operacji pomiaru, zatem hipoteza rozprawy doktorskiej podana przez jej Autora brzmi następująco:

Dodatkowe zasoby klasyczne mogą być użyte do oceny i poprawy jakości implementacji zaszumionych pomiarów kwantowych.

Osiągnięte i zaprezentowane w pracy rezultaty, pozwoliły na lepsze zrozumienie wpływu szumu pomiarowego na ogólną jakość implementacji protokołów informacji kwantowej. Praca wskazała także metody redukcji efektów szumu. Autor wprowadził nową miarę dystansu między obiektami kwantowymi, a dokładniej dla pomiarów kwantowych, które są istotnym tematem podejmowanej w pracy dyskusji.

Miara to została nazwana dystansem średniego przypadku (ang. average-case distances – AC distance). Dystans AC pomiędzy zaszumionym pomiarem a idealnym teoretycznym pomiarem, umożliwia określenie jakości nieidealnego detektora w przypadku średnim. A klasycznym zasobem wykorzystanym w tym celu jest pojęcie losowości. Autor, pokazał że odległość AC między dwoma pomiarami określa również statystyczną rozróżnialność pomiarów, jeśli tylko mamy dostęp do losowej implementacji pewnej klasy losowych obwodów kwantowych (w pracy obwody te określane są jako „unitary 4-designs”).

Wskazano także na niedostatki odległości AC, bo jak podaje Autor choć może ona być użyta do kwantyfikacji jakości implementacji pomiaru, to w ogólności nie dostarcza scenariusza postępowania, aby dany nieidealny pomiar opisać bądź podać jego charakterystykę. Mimo tego braku, Autorowi udało się zaprezentować rozwiązanie tego problemu poprzez metodę rekonstrukcji wybranych typów lokalnego szumu pomiarowego pozyskanych z danych eksperymentalnych. Za proponowano metodę o ang. nazwie: Diagonal Detector Overlapping Tomography (DDOT). Metoda bezpośrednio wykorzystuje klasyczną losowość. Pokazano jak użyć DDOT do redukcji efektów szumu pomiarowego, aby przybliżyć marginalne rozkłady prawdopodobieństwa. Jako przykład przydatności tej metody Autor pokazuje estymację energii lokalnych Hamiltonianów. Tu należy raz jeszcze podkreślić iż redukcja błędów jest klasyczna ponieważ jest realizowana w późniejszej klasycznej obróbce danych eksperymentalnych uzyskanych na nieidealnych eksperymentach kwantowych.

W ogólnej charakterystyce pracy należy też zwrócić uwagę na symulacje numeryczne zrealizowane przez Autora. Zaprezentował on eksperymentalne implementacje opracowanych metod na qubitach nadprzewodzących na dostępnych obecnie sprzętowych implementacjach systemów obliczeń kwantowych.

2 Zawartość rozprawy

Praca została napisana w języku angielskim, i składa się z pięciu głównych rozdziałów, bibliografii oraz dwóch dodatków. Łącznie liczy 165 stron numerowanych (całkowita liczba stron, z uwzględnieniem okładki, stron pomocniczych to 175). Autor rozprawy przedstawił także spis publikacji, odnoszących się bezpośrednio do podejmowanych badań, a także streszczenie pracy w języku polskim oraz języku angielskim.

Rozdział pierwszy stanowi wstęp do rozprawy. W rozdziale drugim zaprezentowano wybrane zagadnienia teoretyczne stanowiące podstawę dla dalszych rozważań przedstawionych w pracy. Główne wyniki pracy zostały przedstawione w rozdziale trzecim pt. „Operational Quantum Average-Case Distances”, w którym wprowadzono definicję miary dystansu średniego. Została ona określana dla trzech obecnie rozpatrywanych zasobów w obliczeniach kwantowych tj. dla stanów, pomiarów oraz kanałów kwantowych. Pokazane zostały też możliwe zastosowania opracowanej miary rozdział 3.6 w którym omówione własności miary jako metryk.

Rozdział czwarty pt. „Modeling and mitigation of correlated readout noise” nadal kontynuuje opis najważniejszych osiągnięć rozprawy. Przedstawiono w nim zasady modelowania szumu oraz przedstawiono eksperymenty, również na rzeczywistych maszynach kwantowych, i przykłady jak w praktyce można zastosować opracowane miary.

Podsumowanie pracy zawarto w rozdziale 5 pt. „Discussion”, gdzie oprócz dyskusji nad otrzymanymi wynikami, Autor nakreśla także obszar dalszych badań.

Należy jeszcze dodać iż w pracy znajdują się dwa dodatki. Pierwszy z nich „Operational Average-Case Distances” zawiera m.in dowód Lematu 5 oraz dowód dla głównego twierdzenia o δ -przybliżeniu czterokrotnej konstrukcji (tłm. recenzenta, w org. δ -approximate 4-designs). Natomiast drugi dodatek pt. „Modeling and mitigation of correlated readout noise”, przedstawia dalsze osiągnięcia Doktoranta przedstawione w rozdziale czwartym. Oprócz dalszej analizy teoretycznej Autor rozprawy opisał eksperymenty numeryczne oraz co stanowi ważny aspekt pracy również zastosowanie opracowanych metod na fizycznych maszynach kwantowych.

3 Najważniejsze osiągnięcia zaprezentowane w rozprawie

Główne wyniki rozprawy zostały zaprezentowane w rozdziałach nr trzy i cztery, a także w Dodatkach A i B. Bowiem w rozdziałach, Autor prezentuje główne osiągnięte rezultaty, natomiast dodatkowe uzupełniające informacje zamieszczono w dodatkach. Należy też dodać iż w Dodatku B, Autor omawia także rezultaty stosowania opracowanych technik na rzeczywistych maszynach kwantowych. W pracy opisano wiele szczegółowych rezultatów, także przedstawiony zostanie tylko ich krótkie wskazanie.

3.1 Kwantowy dystans średniego-przypadku

Rozdział trzeci przedstawia naturalnie pierwszy główny wynik przedstawiony w pracy. Jest to miara nazwana dystansem średniego przypadku. Autor przedstawił pełne motywacje dlaczego tego typu miara jest istotna oraz podał jej definicje w wymienionych wcześniej głównych pojęciach kwantowego modelu obliczeniowego tj. stanu, pomiaru i kanału kwantowego. Podano dowody najważniejszych własności miary, szczególnie w kontekście poprawnej definicji metryki, która każda miara powinna spełniać.

Druga część wyników z tego rozdziału została przedstawiona w podrozdziale 3.5, gdzie poprzez analizę teoretyczną pokazano możliwe zastosowania opracowanych miar. Dodatek A również przedstawia dowody zastosowanych lematów, wraz z rozszerzoną dyskusją nad dowodami Twierdzeń 1, 2, 3.

3.2 Charakterystyka szumu skorelowanego

Rozdział czwarty przedstawia wyniki dotyczące scenariusza, gdzie technikami ang. post-processingu Autor pokazuje jak można zredukować efekt szumu estymując np. wartości lokalnych obserwacji. Ogólnie ta metoda została nazwana jako ang. Diagonal Detector Overlapping Tomography (DDOT), co można wskazać jako drugi główny wynik pracy, potwierdzający hipotezę postawioną

w pierwszej części pracy. Bardzo ważnym rezultatem są eksperymenty na obecnie dostępnych rzeczywistych maszynach kwantowych. Co pozwoliło Autorowi, pokazać iż rozwijana teoria znajduje potwierdzenie w rzeczywistych kwantowych procesach obliczeniowych. Szeroka i wartościowa dyskusja została dostarczona podrozdziale 4.7, bowiem Autor pokazał jak wykorzystać opracowany materiał analityczny do analizy błędu dla algorytmów typu QAOA. Rozdział czwarty, wzorem poprzedniego rozdziału nr trzy, także jest uzupełniony przez Dodatek B, gdzie kontynuowane są rozważania m.in. nad szczegółami metody DDOT.

3.3 Reprodukacja rezultatów

Ważnym elementem w pracy jest także dostarczenie kodów źródłowych proponowanych rozwiązań oraz dostępu do repozytorium, gdzie znajdują się opracowane rozwiązania dla języka Python. Taki rozwiązanie, pozwala na pełną weryfikację proponowanych rozwiązań a także reprodukcję wyników, co ma znacznie dla ostatecznej bardzo dobrej oceny pracy Autora jako całości.

3.4 Uwagi krytyczne oraz pytania

W pracy, mimo iż jest dość obszerna (175 stron), co pozwoliło Autorowi wykazać wiele własności omawianych miar, a także omówić eksperymenty fizyczne i numeryczne, to nadal pewne elementy mogą być dalej doprecyzowane, toteż subiektywnie można zadać następujące pytania, czy też przedstawić następujące uwagi:

- (P1) W twierdzeniu 1, podrozdział 3.4.1, (i podobnie w późniejszych Twierdzeniach 2 i 3) pojawiają się wyprowadzone dwie stałe C oraz a , jednakże poza pokazaniem relacji algebraicznych, w komentarzach nie ma odniesienia do roli tych stałych. Zatem, jaka jest rola tych stałych, dla wyznaczonych miar?
- (P2) W pracy np. w rozdziale 2.5 czy ogólnie w rozdziale 3, wskazuje się, że głębokość obwodów typu „unitary 4-design” wynosi $\log(N) - N$ liczba qubitów. Przy tej informacji znajduje się również wskazanie do pozycji bibliograficznej [54], jednakże w rozprawie nie ma pokazanej ogólnej postaci tych obwodów, i drugie pytanie, czy również dla wyższych jednostek informacji kwantowej (quditów) będzie zachodzić podobna relacja co omawiana w pracy [54].
- (P3) W rozdziale 3, znajdują się wyniki numeryczne zaprezentowane m.in. poprzez Rysunki 3.3, 3.4, jednakże są one niejako przerwane po 12 qubicie, Autor wspomina o braku możliwości obliczeniowych, jednakże brakuje obszerniejszego przedstawienia, dlaczego nie udało się przeprowadzić obliczeń w tych przypadkach dla większej ilości qubitów.
- (P4) W rozdziale 4.6 przedstawiono rezultaty testu, wykorzystując zmienną liczbę instancji, czy też liczby próbek. Pytanie dotyczy ile trzeba wykonywać powtórzeń eksperymentów, czy też ile trzeba zebrać próbek, aby istotnie zwiększyć dokładność estymację energii, i czy można wskazać poziom liczby np. próbek powyżej którego szum stanowi już swoistą barierę przed dalszym zwiększeniem dokładności eksperymentu.

- (P5) W rozdziale 4.7 pt. „Error analysis for QAOA” przeprowadzono analizę siły błędów po zastosowaniu schematu mitygacji szumu, wobec znaczenia algorytmów QAOA, warto postawić bardziej bezpośrednie pytanie jak podobna analiza by wyglądała w przypadku równie szeroko stosowanych obecnie algorytmów VQE, czy zaprezentowana ścieżka analizy błędów mogłaby być zastosowana w przypadku VQE.
- (P6) W Dodatku B, podano trzy algorytmy do konstrukcji obwodów DDOT, choć Autor pracy podał wzorem B.29 oraz wzorem B.30 oraz B.39 ograniczenia na parametry κ , s co do liczby potrzebnych obwodów, to jednak w przedstawionej dyskusji nie podano złożoności obliczeniowej Algorytmów 1, 2, 3. Zatem, w pytaniu (P6) chciałbym poprosić o odniesienie się co do złożoności Algorytmów 1, 2, 3 zarówno złożoności obliczeniowej w sensie liczby potrzebnych operacji oraz pamięciowej tj. niezbędnych zasobów (klasycznych, bądź kwantowych) do poprawnego działania wspomnianych algorytmów.
- (K1) W pracy pojawiają się też uchybienia typograficzne np. na stronie 13 pracy (23, plik PDF) ostatni akapit, mamy odwołanie bibliograficzne 53? (ze znakiem zapytania). Zdarza się, iż poszczególne słowa wychodzą poza obszar głównego strumienia tekstu, np. we streszczeniach polskim i angielskim. Zapis Algorytmu 1 oraz 2 niestety nie jest zbyt czytelny, i wzór B.74 niestety został ucięty i jego koniec znajduje się poza obszarem strony. Jednakże, są to błędy łatwe do naprawienia i nie mają znaczenia dla merytorycznej wysokiej oceny pracy jako całości.

3.5 Pytanie bezpośrednie do rozprawy

W tej części recenzji znajdują się odpowiedzi na ankietowe pytania krótko charakteryzujące całość recenzowanej rozprawy.

- (PO1) Czy tematyka rozprawy jest aktualna i jak jest związana z rozwojem dyscypliny?
- Tak, informatyka kwantowa, czy też obliczenia kwantowe to współcześnie rozwijany dział informatyki którego dynamiczny rozwój obserwujemy od ponad trzydziestu lat. Ostatnie, pojawiające się coraz częściej instalacje systemów kwantowych, naturalnie tylko zwiększają zainteresowanie tym obszarem informatyki, toteż tematyka rozprawy dotycząca szumu oraz pomiarów znakomicie współgra i nawiązuje do aktualnych trendów w obszarze aktualnych rozważań i zastosowań informatyki kwantowej.
- (PO2) Jaki jest problem naukowy podejmowany przez Autora i czy został on trafnie sformułowany?
- Problem naukowy podjęty w pracy został wskazany w Rozdziale 1 recenzji. Autor rozprawy określił hipotezę i wskazał ważność podejmowanego problemu.
- (PO3) Czy Autor rozwiązał postawiony problem i czy wykorzystał w tym celu właściwe metody?
- Tak, zaprezentowane metody, miara AC oraz scenariusze badania szumu, przeprowadzone na wybranych dostępnych obecnie instalacjach kwantowych maszyn obliczeniowych znakomicie wpisują się w aktualnie prowadzone badania dotyczące maszyn NISQ. Przedstawiona analiza teoretyczna potwierdza poprawność proponowanych metod, a dodatkowo eksperymenty numeryczne pozwalają na weryfikację otrzymanych rezultatów.

(PO4) Na czym polega oryginalny wkład Autora w dyscyplinę?

Autor zaproponował nową rodzinę miar o wspólnej nazwie „Operational Quantum Average-Case Distances”, w pracy podano ich możliwe zastosowania. Opracowano także schematy postępowania w celu modelowania szumu podczas operacji pomiaru, co pozwala na polepszenie jakości funkcjonowania określonego algorytmu kwantowego, gdzie zazwyczaj pomiar to jedna z ostatnich wykonywanych operacji. Obydwa osiągnięcia naturalnie bezpośrednio wpisują się w obecny kanon zagadnień informatyki kwantowej, zatem wkład Autora do dyscypliny jest tu bezpośredni.

(PO5) Jakie jest znaczenie poznawcze oraz znaczenie praktyczne wkładu Autora?

Zaproponowane przez Autora metody bezpośrednio odnoszą się do obecnie szeroko dyskusowanego problemu szumu w układzie kwantowym. Zatem tematyka pracy bezpośrednio wpisuje się aktualny trend badań, i ma istotne znaczenie dla systemów NISQ, które obecnie są stają się coraz szerzej dostępne. Zatem poprawa jakości pracy urządzeń kwantowych obecnie dostępnych i w przyszłości poprzez zastosowanie metod Autora naturalnie mają znaczenie fundamentalne i są znaczącym osiągnięciem rozprawy.

(PO6) Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy Autora w zakresie nauk technicznych i szczególowej wiedzy w odpowiadającej zakresowi badań?

Tak, Autor zrealizował wiele eksperymentów w praktyce potwierdzających jakość otrzymanych rezultatów. W Dodatku B przedstawiono numeryczne eksperymenty, a także pokazano wyniki eksperymentów na rzeczywistych systemach kwantowych. Zatem Autor rozprawy równie swobodnie porusza się w obszarze technicznych zastosowań informatyki, co znajduje także potwierdzenie w fakcie rozwijanego oprogramowania którego repozytorium jest dostępne pod adresem: <https://github.com/fbm2718/QREM>.

(PO7) Jakie są słabe strony rozprawy?

Praca, ze względu na obszerność, w sposób wystarczający przedstawia aspekty proponowanych metod. Jednakże, naturalnie pewne elementy jak np. złożoności obliczeniowe mogłyby być szerzej przedstawione. Wydaje się też iż dyskusja nad własnościami proponowanych miar w sensie miary jako pojęcia matematycznego także mogłaby być szerzej opisana. Także, strona typograficzna pracy, w ogólności bardzo dobra, wymaga w kilku przypadkach ingerencji, aby poprawić finalną postać pracy. Jednakże, uwagi te nie mają zasadniczego wpływu na bardzo wysoką ocenę całości rozprawy.

4 Podsumowanie oraz konkluzja końcowa

Dorobek publikacyjny Autora rozprawy, wskazany w pracy liczy siedem pozycji, przy czym jedna z pozycji bibliograficznych, to odniesienie do repozytorium kodu źródłowego. Kod źródłowy odnosi się do pakietu numerycznego, który był wykorzystywany do opracowania wyników zaprezentowanych w Dodatku B. A prace bezpośrednio odnoszące się do tematyki podejmowanej w rozprawie wprost podane przez Autora dysertacji to:

- Operational Quantum Average-Case Distances, F.B.Maciejewski, Z.Puchała, M. Oszmaniec, Quantum 7, 1106 (2023),
- Exploring Quantum Average-Case Distances: Proofs, Properties, and Examples, F.B. Maciejewski, Z. Puchała, M. Oszmaniec, IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 69, no. 7, pp. 4600-4619 (2023),
- Modeling and mitigation of cross-talk effects in readout noise with applications to the Quantum Approximate Optimization Algorithm, F.B. Maciejewski, F. Baccari, Z. Zimborás, M. Oszmaniec, Quantum 5, 464 (2021).

Wskazane prace przynależą do najwyższej punktowanych czasopism o wartości 200pkt, co poświadcza wysoką jakość otrzymanych wyników przez Autora.

W mojej ocenie wyniki przedstawione w rozprawie wynoszą wartościową i ciekawą analizę dotyczącą wybranych typów szumu oraz przedstawiają scenariusze rekonstrukcji wybranych typów lokalnego szumu pomiarowego co w efekcie pozwala na redukcję efektów szumu pomiarowego podczas pracy z układem kwantowym, co stanowi o istotnym wkładzie do dyscypliny naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja.

4.1 Konkluzja końcowa

W konkluzji końcowej należy zatem stwierdzić, że rozprawa doktorska Pana mgr Filipa Maciejewskiego pt. „Zastosowania klasycznej losowości na komputerach kwantowych najbliższej przyszłości” (ang. Applications of classical randomness on near term quantum computers) spełnia wymagania ustawowe i wnoszę o jej przyjęcie oraz dopuszczenie do publicznej obrony.

.....
 Marek Sawerwain 29.05.2025
 (dr hab inż. Marek Sawerwain, prof. UZ)