



dr hab. Magdalena Stobińska, prof. UW
Instytut Informatyki
Wydział Matematyki, Informatyki i Mechaniki
Uniwersytet Warszawski
Banacha 2, 02-097 Warszawa
Tel. 22 5544 226
e-mail: mstobinska@mimuw.edu.pl

Warszawa, 14 czerwca 2025

**Recenzja w postępowaniu
w sprawie nadania mgr. Filipowi Maciejewskiemu
stopnia naukowego doktora**

Podstawą w postępowaniu o przyznanie mgr. Filipowi Maciejewskiemu stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja, jest rozprawa zatytułowana pt. *Zastosowania klasycznej losowości na komputerach kwantowych najbliższej przyszłości* (ang. *Applications of classical randomness on near term quantum computers*), napisana w języku angielskim. Ma ona charakter monografii, lecz napisanej na podstawie trzech publikacji Autora, które są przedstawione w rozdziałach 3 i 4. Została przygotowana pod opieką naukową promotora, prof. dr. hab. Zbigniewa Puchały oraz dr hab. Michała Oszmańca, prof. CFT PAN. Składa się na nią dwujęzyczny abstrakt, spis treści, pięciu rozdziałów, listy referencji oraz dwóch załączników. Łącznie składa się z 175 stron, w tym strony tytułowej, 9 stron wstępnych, 102 stron tekstu rozdziałów, bibliografii z 199 referencjami oraz 40 stron załączników. Praca jest przygotowana bardzo starannie i napisana w poprawnym języku angielskim.

Rozdział pierwszy rozpoczyna się od historycznego przeglądu rozwoju technologii obliczeniowych. Autor wyjaśnia fundamentalne różnice między obliczeniami klasycznymi a kwantowymi, gdzie klasyczne bity zostają zastąpione kubitami. Przedstawia model obliczeń kwantowych oparty na bramkach, gdzie transformacje unitarne działają na kubitach, a wyniki są uzyskiwane poprzez pomiary kwantowe dające probabilistyczne rezultaty klasyczne. Kluczowym problemem omówionym w tym rozdziale jest szum w obecnych prototypach komputerów kwantowych, który stanowi główną przeszkodę w realizacji praktycznie użytecznych obliczeń. Autor wprowadza koncepcję urządzeń NISQ (ang. Noisy Intermediate-Scale Quantum) jako obecnego stanu technologii oraz omawia różnicę między kwantową korekcją błędów (QEC) a mitygacją błędów kwantowych (QEM). Przedstawia główną tezę rozprawy, że dodatkowe zasoby klasyczne - w szczególności losowość klasyczna i post-processing - mogą być wykorzystane do oceny i poprawy jakości implementacji zaszumionych pomiarów kwantowych, co stanowi alternatywne podejście do rozwiązywania problemów związanych z szumem.

Rozdział drugi przedstawia podstawy teoretyczne, koncentrując się na kluczowych koncepcjach teorii informacji kwantowej. Rozpoczyna się od przypomnienia podstawowych postulatów mechaniki kwantowej dla systemów skończeniowymiarowych, gdzie stany kwantowe są reprezentowane przez operatory dodatnio półokreślone o śladzie jednostkowym, ewolucja jest opisywana przez operacje unitarne, a pomiary przez miary dodatnio określonych operatorów (Positive Operator-Valued Measure, POVM). Szczególną uwagę poświęca pomiarom projekcyjnym w bazie obliczeniowej,

które są fundamentalne w kontekście obliczeń kwantowych. Następnie wprowadza szczegółowy opis modelowania szumu, koncentrując się szczególnie na szumie pomiarowym, który jest głównym przedmiotem pracy. Omawia kanały kwantowe jako mapowania CPTP (Completely-Positive-Trace-Preserving) oraz klasyczny model szumu pomiarowego, gdzie związek między idealnym a zaszumionym pomiarem jest opisywany przez macierze stochastyczne. Rozdział przedstawia również konwencjonalne miary odległości między obiektami kwantowymi oparte na optymalnej rozróżnialności statystycznej (odległość śladowa, operacyjna, diamentowa), które charakteryzują scenariusze najgorszego przypadku, oraz wprowadza pojęcie *unitary designs* jako narzędzi do analizy losowych obwodów kwantowych wykorzystywanych w dalszych rozdziałach.

Rozdział trzeci stanowi główny wkład pracy, wprowadzając nowatorskie podejście do mierzenia podobieństwa między obiektami kwantowymi. Przedstawia on wyniki opublikowane w dwóch publikacjach Autora: F. B. Maciejewski, Z. Puchała, M. Oszmaniec, *Quantum* **7**, 1106 (2023) oraz F.B. Maciejewski, Z. Puchała, M. Oszmaniec, *IEEE Transactions on Information Theory* **69**, 4600 (2023). W rozdziale tym, w przeciwieństwie do konwencjonalnych miar odległości opartych na optymalnych protokołach rozróżniania (najgorszy przypadek), Autor proponuje nowe kwantowe *average-case distances* (AC distances), które bazują na średniej rozróżnialności statystycznej przy użyciu losowych obwodów kwantowych tworzących przybliżone *unitary 4-designs*. Te nowe miary mogą być wyrażone przez proste, jawne funkcje będące wielomianami stopnia drugiego obiektów, które są porównywane.

Kluczowym osiągnięciem w tym rozdziale jest wykazanie, że dla obwodów tworzących δ -przybliżone 4-designs, średnia odległość całkowitej wariacji (total variation, TV) między rozkładami prawdopodobieństwa wyjściowymi może być aproksymowana przez te jawne funkcje z znanym błędem względnym. Wszystkie wprowadzone odległości wykorzystują w pewien sposób normę Hilberta-Schmidta, co dostarcza tej normie nowej interpretacji operacyjnej. Autor pokazuje, że te miary spełniają wiele pożądanых funkcji: aksjomaty metryki, subaddytywność względem produktów tensorowych, wspólną wypukłość oraz pewne ograniczone nierówności przetwarzania danych.

Rozdział zawiera szczegółową analizę zastosowań praktycznych, włączając w to badanie efektów szumu w eksperymentach przewagi kwantowej (ang. quantum advantage) opartych na próbkowaniu losowych obwodów, gdzie odległości AC pozwalają na dolne ograniczenie średniej odległości TV między zaszumionymi a idealnymi rozkładami oraz górne ograniczenie odległości między zaszumionymi rozkładami a trywialnymi (jednostajnymi). Przedstawia również zastosowania do efektywnej rozróżnialności wysokowymiarowych obiektów kwantowych bez pamięci kwantowej oraz konsekwencje dla złożoności stanów kwantowych i operacji unitarnych. Rozdział jest uzupełniony przez obszernie symulacje numeryczne porównujące odległości najgorszego i średniego przypadku w praktycznie istotnych scenariuszach.

Rozdział czwarty skupia się na jednym z najważniejszych problemów współczesnych urządzeń kwantowych - charakteryzowania i redukcji skorelowanego szumu pomiarowego. Wprowadza efektywny opis modelu szumu pomiarowego oparty na koncepcji klastrów silnie skorelowanych kubitów i ich sąsiedztw, które mają łagodny wpływ na pomiary. Model ten pozwala na opisanie globalnego szumu przy użyciu znacznie mniejszej liczby parametrów w porównaniu do ogólnego przypadku, pod warunkiem, że rozmiary tych grup są ograniczone przez stałą.

Główną innowacją w tym rozdziale jest wprowadzenie metody Diagonal Detector Overlapping Tomography (DDOT) - uogólnienia niedawno wprowadzonej Quantum Overlapping Tomography na problem rekonstrukcji szumu odczytu o ograniczonej lokalności. DDOT pozwala na charakterystykę k-lokalnych korelacji w szumie pomiarowym na N-kubitowym urządzeniu przy użyciu tylko $O(k 2^k \log(N))$ obwodów kwantowych składających się z losowych kombinacji bramek X i tożsamościowych, co stanowi wykładniczą poprawę w porównaniu do standardowych metod.

Rozdział przedstawia również metody klasycznego post-processingu do mitygacji błędów na poziomie marginalnych rozkładów prawdopodobieństwa, co jest szczególnie istotne dla algorytmów takich jak Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA), które wymagają estymacji energii lokalnych hamiltonianów. Autor wyprowadza górne ograniczenia dla błędów mitygacji oraz analizuje złożoność próbkowania, pokazując, że przy założeniu ograniczonej lokalności szumu odczytu, złożoność próbkowania mitygacji błędów jest podobna do złożoności oryginalnego problemu.

Najważniejsze w pracy są wyniki eksperymentalne uzyskane na 15-kubitowym urządzeniu IBM Melbourne oraz 23-kubitowym podzbiorze urządzenia Rigetti Aspen-8, które pokazują znaczące zyski: średnią redukcję błędów o czynnik ponad 22 (IBM) oraz 5.6 (Rigetti) w porównaniu do braku mitygacji. Interesujące jest, że struktura korelacji w szumie pomiarowym nie odpowiada fizycznemu układowi kubitów w urządzeniach. Rozdział kończy się szczegółową analizą numeryczną wpływu szumu odczytu na wydajność algorytmu QAOA na 8-kubitowym systemie, pokazując, że mitygacja błędów poprawia zarówno dokładność estymacji energii, jak i jakość optymalizacji.

Końcowy rozdział stanowi kompleksowe podsumowanie głównych osiągnięć pracy oraz przedstawia plany dalszych badań. Autor potwierdza potwierdzenie głównej tezy rozprawy, demonstrując, że dodatkowe zasoby klasyczne - losowość i post-processing - mogą być skutecznie wykorzystane do oceny i poprawy jakości implementacji zaszumionych pomiarów kwantowych. W kontekście kwantowych odległości AC, losowość klasyczna okazała się użytecznym narzędziem do uzyskiwania wglądu w zachowanie zaszumionych protokołów kwantowych, podczas gdy w przypadku charakteryzowania szumu odczytu losowość klasyczna była niezbędnym zasobem umożliwiającym efektywną charakteryzację w eksperymentach.

Przyszłe kierunki badań postulowane przez Autora obejmują rozwój metod estymacji kwantowych odległości AC w łatwych do implementacji układach eksperymentalnych, połączenie tych miar z powszechnie używanymi wskaźnikami jakości urządzeń kwantowych oraz rozszerzenie wyników na inne funkcje wyjściowych rozkładów prawdopodobieństwa. W kontekście charakteryzowania i mitygacji szumu odczytu, autor proponuje testowanie metod w rzeczywistych wielokubitowych eksperymentach QAOA i Variational Quantum Eigensolver (VQE), rozszerzenie analiz błędów statystycznych na scenariusze VQE w którym lokalne składniki nie komutują, oraz rozwój bardziej zaawansowanych metod wnioskowania o strukturze korelacji z danych DDOT. Według autora, szczególnie obiecujące jest połączenie przedstawionych technik z metodami korekcji błędów kwantowych oraz badanie zastosowań w urządzeniach opartych na różnych architekturach (kubity strumieniowe, spletkowane jony, systemy fotoniczne). Praca kończy się wnioskiem, że przedstawione wyniki będą przydatne zarówno w zastosowaniach krótko- jak i długoterminowych jako efektywne metody charakteryzowania i redukcji szumu pomiarowego, co czyni je istotnym wkładem w rozwój technologii kwantowych ery NISQ.

Tematyka rozprawy jest wysoce aktualna i bezpośrednio związana z kluczowymi wyzwaniami współczesnych obliczeń kwantowych. W obecnej erze NISQ, w której urządzenia kwantowe charakteryzują się znaczącym poziomem szumu, problem charakteryzacji i mitygacji błędów pomiarowych stanowi jeden z najważniejszych problemów inżynierskich. Rozprawa adresuje fundamentalne pytanie: jak efektywnie wykorzystać ograniczone zasoby kwantowe przy wsparciu dostępnych zasobów klasycznych? To podejście jest zgodne z obecnymi trendami, w których podejście hybrydowe kwantowo-klasyczne zyskuje na znaczeniu. Badania nad miarami jakości implementacji protokołów kwantowych oraz praktycznymi metodami redukcji szumu są obecnie priorytetowymi obszarami badawczymi, co potwierdzają liczne publikacje w czołowych czasopismach naukowych.

Ponadto, Autor trafnie identyfikuje i formułuje problem naukowy w postaci głównej hipotezy badawczej, dotyczącej tego, że dodatkowe zasoby klasyczne mogą być użyte do oceny i poprawy jakości implementacji zaszumionych pomiarów kwantowych. Problem ten ma dwie komplementarne części: teoretyczną (jak kwantyfikować jakość pomiarów kwantowych w realistycznych

scenariuszach) oraz praktyczną (jak efektywnie charakteryzować i redukować szum pomiarowy). Sformułowanie to jest precyzyjne i operacyjne, umożliwiając zarówno teoretyczną analizę, jak i empiryczną weryfikację. Autor jasno wyznacza granice swojego badania, koncentrując się na pomiarach w bazie obliczeniowej i klasycznym modelu szumu, co jest uzasadnione praktycznymi ograniczeniami obecnych urządzeń kwantowych.

Autor w pełni rozwiązał postawiony problem, wykorzystując właściwe i różnorodne metody badawcze. W części teoretycznej zastosował zaawansowane narzędzia matematyczne (np. teorię *unitary designs*, analizę funkcjonalną) do wyprowadzenia kwantowych odległości AC z rygorystycznymi dowodami matematycznymi. Natomiast w części praktycznej opracował algorytm DDOT oparty na teorii funkcji mieszających i probabilistycznych argumentach, zapewniających skalowalność. Metody eksperymentalne obejmują systematyczne testy na różnych platformach sprzętowych (IBM, Rigetti) z dokładną analizą statystyczną wyników. Szczególnie wartościowe jest połączenie symulacji numerycznych z eksperymentami rzeczywistymi, co zapewnia wielopoziomą weryfikację teoretycznych przewidywań.

Wkład Autora ma trzy główne komponenty oryginalne. Po pierwsze, jest to wprowadzenie kwantowych odległości AC, które stanowi przełom w sposobie myślenia o miarach podobieństwa obiektów kwantowych, zmieniając punkt widzenia z pesymistycznych scenariuszy najgorszego przypadku na realistyczne scenariusze średniego przypadku. Po drugie, opracowanie metody DDOT rozwiązuje praktyczny problem charakteryzowania skorelowanego szumu pomiarowego z logarytmiczną złożonością, co było wcześniej niemożliwe. Po trzecie, model szumu oparty na klastrach i sąsiedztw stanowi nowy paradygmat modelowania korelacji w urządzeniach kwantowych, który jest efektywny obliczeniowo. Dodatkowo, operacyjna interpretacja normy Hilberta-Schmidta przez odległości AC wypełnia lukę w teorii miar kwantowych.

Znaczenie poznawcze pracy obejmuje nowe rozumienie roli losowości klasycznej w protokołach kwantowych, pokazanie, że średni przypadek może być traktowany analitycznie mimo dużej złożoności najgorszego przypadku, oraz dostarczenie nowych narzędzi do analizy algorytmów kwantowych z perspektywy teorii złożoności. Znaczenie praktyczne pracy jest również istotne: metody Autora umożliwiają znaczną redukcję błędów w rzeczywistych eksperymentach, dostarczają skalowalnych narzędzi do charakteryzacji urządzeń NISQ oraz zwiększają dokładność algorytmów optymalizacyjnych takich jak QAOA. Opracowane metody mają bezpośrednie zastosowanie w bieżących eksperymentach kwantowych i mogą przyspieszyć rozwój praktycznych zastosowań obliczeń kwantowych. Udostępnienie implementacji w publicznym repozytorium dodatkowo zwiększa praktyczny wpływ pracy.

Rozprawa jednoznacznie świadczy o dużej wiedzy Autora w szerokim spektrum dziedzin. W części teoretycznej pracy zademonstrował on znajomość teorii informacji kwantowej, teorii miary, analizy funkcjonalnej i teorii prawdopodobieństwa. W aspektach praktycznych Autor wykazuje biegłość w programowaniu kwantowym, analizie statystycznej, optymalizacji numerycznej oraz praktycznych aspektach pracy z rzeczywistymi urządzeniami kwantowymi różnych producentów. Szczególnie cenne jest połączenie teoretycznej precyzji z praktyczną intuicją inżynierską, co pozwala na tworzenie rozwiązań zarówno matematycznie eleganckich, jak i praktycznie użytecznych. Bogata bibliografia i umiejętne osadzenie pracy w kontekście aktualnych badań świadczą o szerokich horyzontach naukowych Autora.

Główne ograniczenia pracy dotyczą założeń upraszczających, które choć uzasadnione praktycznie, mogą ograniczać ogólność wyników. Koncentracja na klasycznym modelu szumu pomiarowego pomija efekty koherentne, które mogą być istotne w niektórych zastosowaniach. Badania eksperymentalne, choć przekonujące, są ograniczone do platform nadprzewodzących i relatywnie małych systemów (do 23 kubitów), co pozostawia pytania o skalowalność na większe systemy i inne architektury kwantowe. W analizie teoretycznej, wymaganie δ -przybliżonych 4-designs z bardzo małymi wartościami δ może być trudne do spełnienia w praktyce, choć Autor argumentuje, że można

to osiągnąć z logarytmiczną głębokością obwodów. Niektóre aspekty charakterystyki korelacji w metodzie DDOT opierają się na heurystykach, które mogłyby zostać bardziej precyzyjnie sformalizowane. Niemniej jednak, te ograniczenia nie umniejszają znaczącej wartości przedstawionych wyników i są niezbędne dla praktycznej implementowalności metod.

Należy także zauważyć, że oprócz trzech publikacji naukowych opisanych w rozprawie, mgr Filip Maciejewski jest współautorem trzech innych prac, z których dwie zostały opublikowane w czasopiśmie Quantum oraz jedna – w Physical Review A, oraz publicznie dostępnego kodu na platformie GitHub, który uzupełnia pracę.

Uważam, że wniosek w sprawie nadania mgr. Filipowi Maciejewskiemu stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja, jest mocno uzasadniony z uwagi na wysoką jakość prowadzonych przez niego badań. Przedstawiona rozprawa pt. *Zastosowania klasycznej losowości na komputerach kwantowych najbliższej przyszłości* (ang. *Applications of classical randomness on near term quantum computers*), spełnia z wymogi stawiane rozprawom doktorskim. Wniosuję zatem o dopuszczenie pana mgr. Filipa Maciejewskiego do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.



dr hab. Magdalena Stobińska, prof. UW