

Poznań, 09.10.2025 r.

Dr hab. inż. Krzysztof Kurowski
Poznańskie Centrum Superkomputerowo – Sieciowe
Instytut Chemii Bioorganicznej PAN
ul. Jana Pawła II 10
61-139 Poznań

Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej
Polskiej Akademii Nauk
ul. Bałtycka 5
44-100 Gliwice

Recenzja

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Filipa Maciejewskiego zatytułowana „Zastosowania klasycznej losowości na komputerach kwantowych najbliższej przyszłości” (ang.: *"Applications of classical randomness on near term quantum computers"*). Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. Zbigniew Puchała, a promotorem pomocniczym dr hab. Michał Oszmaniec. Recenzja została opracowana na podstawie zlecenia i uchwały Rady Naukowej IITiS PAN nr RN/10/2025 z dnia 27.03.2025.

1. Znaczenie podjętej tematyki oraz rozwój dyscypliny

Implementacja pomiarów na współczesnych urządzeniach kwantowych NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) stanowi jedno z fundamentalnych zagadnień badań nad praktyczną realizacją obliczeń kwantowych oraz wyzwań we współczesnej informatyce kwantowej. Proces pomiaru w mikroskali jest szczególnie podatny na działanie szumów i błędów detekcji, a ponadto prowadzi do nieodwracalnego zniszczenia stanu kwantowego, co znacząco utrudnia precyzyjną rekonstrukcję oraz analizę wyników eksperymentalnych, uruchamianych na różnych typach urządzeń kwantowych NISQ opartych m.in. na nadprzewodzących kubitach, uwięzionych jonach czy fotonicznych układach kwantowych. W praktyce pomiary te obciążone są błędami wynikającymi z niedoskonałości elementów detekcji, niepełnej kalibracji układu oraz wpływu środowiska zewnętrznego.

Jednym z kluczowych zadań w charakterystyce urządzeń kwantowych w erze NISQ – jak trafnie podkreśla Doktorant już we wstępie rozprawy – jest ilościowe określenie stopnia, w jakim rzeczywista implementacja pomiaru odbiega od modelu idealnego, opisanego w teorii mechaniki kwantowej. Podjęta w rozprawie problematyka zyskuje zatem szczególne znaczenie badawczo-rozwojowe w obliczu ograniczeń technologicznych oraz licznych wyzwań towarzyszących obecnie rozwojowi urządzeń kwantowych NISQ. Zaproponowane przez Doktoranta analizy teoretyczne, w szczególności nowe miary i metody mitygacji błędów wraz

z eksperymentami obliczeniowymi stanowią doskonały przykład efektywnego wykorzystania urządzeń kwantowych NISQ przy jednoczesnym kompensowaniu ich niedoskonałości dzięki wsparciu obliczeń realizowanych na zintegrowanych zasobach klasycznych. To właśnie silna integracja tych dwóch typów zasobów w praktyce umożliwia projektowanie i implementację nowych, adaptacyjnych strategii sterowania obwodami, zaawansowanego post-processingu oraz nowoczesnych metod redukcji szumów, co w konsekwencji prowadzi do zwiększenia dokładności i stabilności uzyskiwanych wyników pomiarowych na urządzeniach kwantowych NISQ. Zaproponowane w rozprawie doktorskiej autorskie podejścia demonstrują bardziej efektywne wykorzystanie rosnącej liczby niedoskonałych, fizycznych kubitów oraz większej głębokości obwodów uruchamianych na urządzeniach NISQ, a w efekcie w sposób naturalny wskazują na potrzeby dalszego rozwoju skalowalnych, hybrydowych, klasyczno-kwantowych architektur obliczeniowych.

Podjęte przez Doktoranta zagadnienia badawcze wpisują się bezpośrednio w aktywny nurt często złożonych i zaawansowanych badań interdyscyplinarnych łączących informatykę techniczną, informatykę kwantową, fizykę i matematykę, przy jednocześnie silnym podłożu eksperymentalnym oraz dynamicznie zmieniającym się kontekście sprzętowo-programowym stojącym za rozwojem nowych generacji urządzeń kwantowych NISQ. Warto zaznaczyć, że zintegrowane klasyczno-kwantowe systemy w ostatnich latach znalazły się w centrum zainteresowania wiodących ośrodków badawczych i superkomputerowych – takich jak RIKEN, Oak Ridge National Laboratory, Lawrence Livermore National Laboratory, GENCI, Jülich Supercomputing Centre czy Leibniz Supercomputing Centre – jak i największych firm technologicznych, m.in. IBM Q, Google, D-Wave, Fujitsu oraz NVIDIA. Na całym świecie opracowywane i testowane są obecnie liczne protokoły i metody mitygacji oraz korekcji błędów (w tym ich sprzętowe implementacje) coraz bardziej odpornych na szумы pomiarowe, które mogą być wykorzystywane do badania algorytmów hybrydowych wykorzystujących efektywnie połączone zasoby klasyczne i kwantowe. Dostępne rozwiązania często stanowią jeszcze zaawansowane prototypy przyszłych środowisk obliczeniowych, w których klasyczne i wysokowydajne zasoby będą mogły wykorzystywać procesory kwantowe do rozwiązywania specyficznych klas problemów – analogicznie do roli, jaką obecnie pełnią procesory graficzne (GPU) w systemach superkomputerowych. Takie rozwiązania umożliwiają wykorzystanie potencjału urządzeń kwantowych NISQ przy silnym wsparciu klasycznych zasobów obliczeniowych, kompensując ograniczoną liczbę kubitów oraz wysoki poziom szumów pomiarowych wpływających bezpośrednio na jakość wyników obliczeń. W wielu praktycznych przypadkach, takich jak omawiane w rozprawie hybrydowe klasyczno-kwantowe algorytmy VQE czy QAOA, klasyczny komputer – często w postaci klasycznego wyspecjalizowanego komputera wyposażonego w akceleratory GPU lub FPGA – steruje procesorem kwantowym w iteracyjnym cyklu optymalizacyjnym, a uzyskane wyniki jak dowodzi w rozprawie Doktorant mogą być korygowane różnymi metodami mitygacji błędów. Nowe rozwiązania hybrydowe klasyczno-kwantowe stanowią zatem istotny krok w kierunku praktycznego wykorzystania nowej generacji symulacji i obliczeń komputerowych, choć ich możliwości obliczeniowe pozostają obecnie nadal mocno ograniczone. W szczególności brak pełnej korekcji błędów uniemożliwia na tym etapie rozwoju komputerów kwantowych realizację długotrwałych, precyzyjnych obliczeń oraz przejście od ery NISQ do ery FTQC (Fault-Tolerant Quantum Computing) – komputerów kwantowych odpornych na błędy. Hybrydowe architektury należy zatem postrzegać jako etap przejściowy – pomost pomiędzy współczesnymi urządzeniami kwantowymi NISQ a przyszłymi komputerami kwantowymi klasy FTQC.

2. Analiza i ocena problemu naukowego na podstawie analizy poszczególnych fragmentów pracy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Filipa Maciejewskiego to spójny tematycznie opis oryginalnej pracy naukowej bazującej na trzech wybranych i wysokopunktowanych naukowych publikacjach współautorskich, w których Doktorant jest pierwszym autorem, odpowiednio:

- Operational Quantum Average - Case Distances, F.B. Maciejewski, Z. Puchała, M. Oszmaniec, Quantum 7, 1106 (2023) – 140 pkt. MNiSW;
- 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) – 200 pkt. MNiSW;
- 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) - 140 pkt. MNiSW.

Przedłożona rozprawa doktorska składa się z pięciu głównych rozdziałów tematycznych oraz dwóch załączników – A i B – opisujących odpowiednio: dowody przytaczanych w pracy twierdzeń oraz szczegóły techniczne procedury mitygacji błędów dla marginalnych rozkładów w modelach skorelowanego szumu odczytu, procedury i wyniki charakteryzacji szumu, a także dodatkowe dane eksperymentalne oraz szczegóły symulacji numerycznych wykorzystanych w badaniach. Całość pracy obejmuje 165 stron, łącznie z bibliografią oraz załącznikami A i B. Warto w tym miejscu podkreślić, że od ponad dwóch lat Doktorant wykazuje dużą aktywność naukową, potwierdzoną nowymi publikacjami będącymi efektem międzynarodowej współpracy naukowo-badawczej.

Główna teza doktoratu mgr. inż. Filipa Maciejewskiego została sformułowana poprawnie i w przemyślany sposób: *Dodatkowe zasoby klasyczne mogą być użyte do oceny i poprawy jakości implementacji zaszumionych pomiarów kwantowych.*

Badania opisane w rozprawie doktorskiej koncentrują się na efektywnym wykorzystaniu ograniczonych zasobów kwantowych poprzez dodatkowe wykorzystanie zasobów klasycznych oraz wypracowaniu wymagań dla nowej hybrydowej, klasyczno-kwantowej architektury obliczeniowej dedykowanej współczesnym urządzeniom kwantowym NISQ. Doktorant już we wstępnych rozdziałach pracy znaczną część rozważań poświęca szczegółowej analizie teoretycznej właściwości pomiarów kwantowych, które stanowią zacząć sformułowania autorskiej metody wykorzystującej klasyczną losowość oraz analizę statystyczną do rekonstrukcji właściwości pomiarowych – bez potrzeby przeprowadzania złożonej, pełnej tomografii kwantowej. Doktorant bardzo sprawnie posługując się aparatem matematycznym i fizycznym, charakteryzuje różne miary odległości między pomiarami kwantowymi, a także przeprowadza trafne analizy dotyczące złożoności obliczeniowej zaproponowanych formuł numerycznych. Uzasadnia przy tym dobór odpowiedniej miary odległości, uwzględniając losowo generowane przez złożone obwody stany kwantowe, oraz wprowadza autorskie pojęcie miary średniego przypadku (Average-Case Distance), opisującej statystyczną różnicę pomiędzy pomiarami kwantowymi. Zaproponowana miara opiera się na uśrednieniu rozróżnialności po losowych stanach lub obwodach kwantowych, co czyni ją szczególnie przydatną w analizie rzeczywistych urządzeń kwantowych NISQ. Doktorant

wykazuje ponadto, że zastosowanie zaproponowanej analizy w średnim przypadku pozwala zdefiniować miary jakości pomiarów w sposób bardziej odporny na szumy kwantowe, co znacząco zwiększa ich użyteczność w szeroko rozumianej diagnostyce urządzeń. Takie podejście umożliwia również ilościowe porównywanie różnych implementacji pomiarów oraz ocenę wpływu zaburzeń bez konieczności znajomości wszystkich szczegółów fizycznego modelu błędu.

Wnioski sformułowane przez Doktoranta są spójne i przemyślane – obejmują analizę złożoności obliczeniowej zaproponowanej miary oraz, co istotne, podkreślają efektywność opracowanych procedur numerycznych. W rozprawie omówiono również istotne własności fizyczne miar oraz ich relacje z klasycznymi miarami odległości, w szczególności w kontekście stabilności względem ekstremalnych fluktuacji pomiarowych wynikających z błędów statystycznych lub szumów eksperymentalnych. Z perspektywy dalszych prac rozwojowo-wdrożeniowych, szczególnie istotne są wskazane przez Doktoranta potencjalne obszary zastosowań miary średniego przypadku – jako bazowego wskaźnika jakości implementacji pomiarów w urządzeniach kwantowych NISQ, metryki porównawczej w procesach kalibracji i optymalizacji detektorów. Zaproponowane miary mogą być wykorzystane jako kryterium stabilności w kwantowych algorytmach wariacyjnych, takich jak popularne obecnie podejścia aplikacyjne bazujące na VQE (Variational Quantum Eigensolver) i QAOA (Quantum Approximate Optimization Algorithm), w których nawet niewielkie różnice w wynikach pomiarów mogą istotnie wpływać na przebieg i końcowy rezultat procesu optymalizacji. To właśnie małoskalowe obwody kwantowe wariacyjne VQE i QAOA, opisane obszernie w rozdziale 3.5.4 zostały poddane w rozprawie doktorskiej wnikliwej ocenie empirycznej, w tym analizie zachowania trzech zaproponowanych miar w funkcji rozmiaru układu kwantowego i rosnącej liczby fizycznych kubitów oraz typu obwodu wariacyjnego. W eksperymentach obliczeniowych porównywano odległość między rozkładami prawdopodobieństwa generowanymi przez rzeczywiste obwody kwantowe a rozkładami idealnymi. Uzyskane wyniki potwierdzają przyjęte wcześniej przez Doktoranta założenia, że miary średniego przypadku trafnie przybliżają rzeczywiste wartości odległości między rozkładami dla losowych obwodów kwantowych. Warto również zaznaczyć, że uzyskane wyniki są spójne dla różnych typów obwodów wariacyjnych QAOA i VQE, co jest podstawą do stwierdzenia, iż zaproponowane miary mają również charakter uniwersalny. Dodatkowo, przeprowadzona przez Doktoranta analiza histogramów i wartości średniej TVD (Total Variation Distance) wykazała, iż rozkłady koncentrują się w pobliżu granic teoretycznych, co potwierdza trafność przyjętego modelu oraz praktyczną użyteczność miar średniego przypadku w analizie statystycznej zachowania zaszumionych obwodów kwantowych.

Zaproponowane miary średniego przypadku jak słusznie zauważa Doktorant są też skalowalne i relatywnie stabilne numerycznie. Otrzymane wyniki eksperymentalne korelują z poziomem szumu oraz błędami implementacyjnymi pomiarów, zachowując jednocześnie prostą interpretację geometryczną i ścisłą relację z normą Frobeniusa. Nowe miary mogą być zatem efektywnie estymowane przy użyciu losowych obwodów, co umożliwia ich praktyczne zastosowanie w warunkach eksperymentalnych. Stanowią one również wartościowe narzędzie diagnostyczne, umożliwiające porównywanie jakości pomiarów między różnymi urządzeniami kwantowymi, kalibrację torów detekcyjnych oraz walidację wyników wariacyjnych algorytmów klasyczno-kwantowych. Ich niewątpliwą zaletą jest niska złożoność obliczeniowa oraz odporność na pojedyncze odchylenia statystyczne, dzięki czemu dobrze sprawdzają się jako wskaźniki ogólnej jakości lub kryteria porównawcze pomiędzy różnymi eksperymentami. Należy jednak pamiętać, że uśrednianie prowadzi do utraty informacji o strukturze błędów i może maskować lokalne obszary o podwyższonej zawodności. Z tego względu pełniejszy

obraz jakości badanego systemu uzyskuje się zazwyczaj poprzez zastosowanie analizy wielokryterialnej, obejmującej równoczesne uwzględnienie wielu miar lub kryteriów oceny – takich jak wiarygodność stanów, stabilność pomiarów czy wrażliwość na szum. Podejście to pozwala identyfikować kompromisowe rozwiązania pomiędzy dokładnością, stabilnością i odpornością na błędy, stanowiąc istotne uzupełnienie uśrednionych wskaźników w procesach optymalizacji, benchmarkingu i kalibracji urządzeń kwantowych NISQ. Uśredniona miara pozostaje skutecznym narzędziem oceny globalnej jakości, jednak dopiero pełna analiza wielokryterialna umożliwia głębsze zrozumienie struktury i charakterystyki badanego systemu. W praktyce badawczej oba podejścia są komplementarne – pierwsze służy do szybkiej oceny ogólnej sprawności, drugie natomiast do pogłębionej diagnostyki i dodatkowej optymalizacji badanego systemu klasyczno-kwantowego. W rozprawie doktorskiej zabrakło analizy wielokryterialnej oraz prezentacji jej potencjalnego zastosowania w interpretacji wyników eksperymentalnych.

Główne założenia, analizy oraz wnioski w pierwszych rozdziałach rozprawy stanowiły podstawę do wprowadzenia przez Doktoranta autorskiej metody DDOT (Diagonal Detector Overlapping Tomography). Metoda DDOT wykorzystuje klasyczną losowość oraz statystyczne nakładanie wyników pomiarowych w celu wydobycia informacji o błędach pomiarowych. Zamiast rekonstruować pełną macierz POVM (Positive Operator-Valued Measure), koncentruje się ona na jej części diagonalnej w bazie obliczeniowej, która dominuje w rzeczywistych pomiarach realizowanych na współczesnych procesorach kwantowych. Wyniki eksperymentalne przedstawione w rozdziale 4 potwierdzają, że metoda DDOT stanowi efektywny kompromis między dokładnością a kosztem obliczeniowym. Ponadto, dzięki wykorzystaniu klasycznej losowości, możliwe jest uzyskanie bogatej informacji o strukturze błędów bez konieczności przeprowadzania pełnej tomografii kwantowej.

W ramach zaawansowanego studium przypadków w rozdziale 4 Doktorant przeprowadził kompleksową analizę obejmującą kilka etapów badawczych, ukierunkowanych na zrozumienie i ograniczenie wpływu błędów pomiarowych w urządzeniach kwantowych NISQ. W pierwszym etapie badań opracowano model skorelowanego szumu odczytu, opisujący współzależności pomiędzy błędami występującymi na różnych fizycznych kubitach. Następnie przeprowadzono efektywną charakteryzację szumu odczytu, wykorzystując metody statystyczne i losowe procedury pomiarowe w celu precyzyjnego określenia parametrów szumu. Kolejny etap obejmował mitygację błędów na poziomie rozkładów granicznych, pozwalającą na lokalną korekcję błędów pomiarowych bez potrzeby pełnej tomografii kwantowej. Dokonano również eksperymentalnej walidacji modelu szumu na rzeczywistych procesorach kwantowych NISQ, potwierdzając jego zgodność z obserwowanymi danymi. W rozdziale tym Doktorant przeprowadził również analizę błędów dla obwodów kwantowych QAOA, wskazującą na ich wpływ na dokładność i stabilność wyników obliczeń. Ostatecznie wykonano numeryczne badania wpływu błędów pomiarowych dla obwodów kwantowych QAOA, które umożliwiły ilościową ocenę skuteczności zaproponowanych metod mitygacji i ich potencjał w praktycznych zastosowaniach obliczeń kwantowych.

Rozprawę doktorską zakończono omówieniem możliwych kierunków dalszych badań, w tym potencjalnego wykorzystania zaproponowanych metod do mitygacji błędów w urządzeniach kwantowych NISQ, opartych na innych technologiach kwantowych, takich jak spulapkowane jony czy fotoniczne układy kwantowe. Niestety w rozprawie zabrakło części eksperymentalnej lub teoretycznej analizy możliwości zastosowania proponowanych rozwiązań w odniesieniu do innych typów urządzeń kwantowych NISQ, które – podobnie jak systemy oparte na nadprzewodzących kubitach – stanowią obecnie konkurencyjne technologie dynamicznie i

prężnie rozwijane w ramach globalnych badań i zastosowań nad obliczeniami klasyczno-kwantowymi.

3. Oryginalny wkład Doktoranta i znaczenie praktyczne podjętych badań

Zakres działań naukowych przedstawionych w pracy odpowiada wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim w dziedzinie nauk technicznych – zarówno pod względem stopnia trudności, jak i oryginalności.

Oryginalny wkład Doktoranta ma zarówno wymiar teoretyczny w postaci zaawansowanych analiz matematycznych, jak i wyraźny wymiar praktyczny, obejmujący opracowanie nowych miar oraz metod numerycznych niezbędnych do pogłębionej analizy i charakteryzacji pomiarów wraz z ich przykładowymi zastosowaniami w wybranych algorytmach oraz urządzeniach kwantowych NISQ. W tym kontekście, na szczególne podkreślenie zasługuje opracowana przez Doktoranta metoda DDOT, stanowiąca oryginalne i zasobowo efektywne podejście do charakteryzacji błędów pomiarowych. Metoda ta łączy klasyczną losowość z analizą statystyczną wyników pomiarowych, umożliwiając rekonstrukcję kluczowych właściwości pomiaru przy znacznie mniejszej liczbie eksperymentów niż w klasycznej tomografii kwantowej.

W zaprezentowanych eksperymentach obliczeniowych, opartych na autorskich podejściach, Doktorant w sposób nowatorski wykorzystał klasyczne zasoby, demonstrując zwiększoną efektywność i wiarygodność obliczeń kwantowych poprzez skuteczne ograniczenie wpływu klasycznego szumu pomiarowego. Szczegółowo przeanalizowane w rozprawie wyniki dowodzą, że odpowiednio zaprojektowane procedury numeryczne, uruchamiane na klasycznych zasobach, mogą istotnie zmniejszać wpływ szumów i błędów detekcji, otwierając tym samym nowe możliwości w zakresie eksperymentalnej weryfikacji teorii pomiarów kwantowych. Łącząc klasyczne przetwarzanie danych z elementem losowości, zaproponowana metoda DDOT stanowi przykład hybrydowej architektury klasyczno-kwantowej, umożliwiającej uśrednianie efektów szumów, redukcję błędów statystycznych oraz poprawę jakości zaszumionych danych pomiarowych. Warto zaznaczyć, że Doktorant przeprowadził liczne symulacje numeryczne analizujące wpływ skorelowanego szumu pomiarowego na proces optymalizacji hybrydowego klasyczno-kwantowego algorytmu wariacyjnego QAOA, z jednoczesnym zastosowaniem nowego podejścia do mitygacji błędów. Wyniki eksperymentalne, uzyskane na urządzeniach kwantowych Rigetti oraz IBM Q, potwierdziły skuteczność zaproponowanych metod charakteryzacji i kompensacji błędów. Szczególnie znaczące rezultaty odnotowano w eksperymentach z piętnastoma fizycznymi kubitami przeprowadzonych na urządzeniu IBM Q, gdzie uzyskano redukcję błędów sięgającą nawet ponad dwudziestokrotnego zmniejszenia ich wpływu.

Praktyczne i aplikacyjne znaczenie rozprawy doktorskiej oceniam bardzo wysoko, ponieważ zaprezentowane metody numeryczne mogą być bezpośrednio wykorzystane – również na podstawie opublikowanych i publicznie dostępnych kodów źródłowych (pomimo braku ich dalszego rozwoju w ostatnim okresie) – w testowych procedurach kalibracji, benchmarkingu oraz diagnostyce różnych procesorów kwantowych w rzeczywistych urządzeniach kwantowych NISQ dostępnych dla użytkowników. Dodatkową zaletą zaproponowanych

metod jest ich kompatybilność z popularnymi, otwartymi środowiskami obliczeniowymi, w szczególności Qiskit i Cirq, co umożliwia ich szybkie i praktyczne wdrożenie w nowych eksperymentach obliczeniowych.

Reasumując, opracowane podejścia tworzą interesujący i oryginalny zestaw nowych narzędzi oraz metod wspierających dalszy rozwój skalowalnych, hybrydowych klasyczno-kwantowych systemów obliczeniowych, w których klasyczne przetwarzanie informacji efektywnie wspiera ograniczone i nadal istotnie zaszumione urządzenia kwantowe NISQ. Zaproponowaną przez Doktoranta metodę DDOT należy uznać za ważny krok w kierunku praktycznej, hybrydowej charakterystyki i mitygacji błędów pomiarów kwantowych oraz znaczący wkład w rozwój automatycznych procedur diagnostycznych dla obecnych i przyszłych, skalowalnych architektur kwantowych – w okresie przejściowym między erą NISQ a FTQC. Opracowane rozwiązania wpisują się w aktualny nurt badań nad praktycznymi metodami mitygacji błędów i redukcji szumów w obliczeniach kwantowych, a w dalszej perspektywie mogą stanowić również podstawę dla w pełni automatycznych procedur diagnostycznych w komputerach kwantowych. Obszar potencjalnych zastosowań wyników badań Doktoranta może zostać w przyszłości ograniczony przez dynamiczny rozwój alternatywnych i skutecznych technik korekcji błędów, które mogą znacząco obniżyć poziom szumów kwantowych, a tym samym znacząco poprawić jakość obliczeń wykonywanych na najnowszej generacji komputerów kwantowych. Nie zmienia to jednak faktu, że rozprawa doktorska podejmuje aktualne i istotne zagadnienia naukowo-badawcze w informatyce kwantowej.

Pomimo pewnych drobnych braków i pomyłek redakcyjno-edytorskich, nieco zawężonego zakresu rozważań i eksperymentów obliczeniowych na innych niż urządzenia kwantowe NISQ bazujące na nadprzewodzących kubitach, **rozprawa doktorska jest merytorycznie przekonująca**. Przedstawione wyniki eksperymentów obliczeniowych potwierdzają **sluszność przyjętej tezy badawczej**, że dodatkowe zasoby klasyczne mogą być użyte do oceny i poprawy jakości implementacji zaszumionych pomiarów kwantowych.

4. Ocena końcowa pracy

Na podstawie przedstawionej rozprawy doktorskiej stwierdzam, że **Doktorant posiada szczegółową wiedzę w zakresie nauk technicznych oraz nabył wymagane doświadczenie i umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej**.

Stwierdzam również, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Filipa Maciejewskiego pt.: „Zastosowania klasycznej losowości na komputerach kwantowych najbliższej przyszłości” (ang.: *“Applications of classical randomness on near term quantum computers”*) **spełnia wymogi określone w Ustawie o stopniach i tytule naukowym**, w tym: art. 14 ust. 2 pkt 2 i art. 20 ust. 5 ustawy z dnia 14.03.2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789 z późn. zm.).

W związku z tym **wnoszę o dopuszczenie Pana mgr. inż. Filipa Maciejewskiego do publicznej dyskusji nad Jego rozprawą doktorską** w Instytucie Informatyki Teoretycznej i Stosowanej Polskiej Akademii Nauk w Gliwicach.

