

prof. dr hab. Zbigniew Puchała
Instytut Informatyki
Teoretycznej i Stosowanej PAN
ul. Bałtycka 5, 44-100 Gliwice

Gliwice, 31 styczeń 2025 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Moeina Naseri pt. „Quantum Resources in Quantum Technologies”

Uwagi wstępne

Rozprawa doktorska pt. „Quantum Resources in Quantum Technologies” autorstwa Moeina Naseriego liczy 140 stron i została napisana w języku angielskim, z polskim streszczeniem na początku. Tytuł pracy trafnie oddaje jej treść, koncentrując się na kluczowych zasobach kwantowych, takich jak spójność, splątanie i czystość, istotnych dla rozwoju technologii kwantowych.

Praca składa się z siedmiu rozdziałów. W rozdziale pierwszym autor wprowadza teorie zasobów kwantowych, podkreślając ich zastosowanie w technologii kwantowej. Rozdział drugi omawia ograniczenia szybkości w transformacjach baz kwantowych oraz generacji zasobów, wprowadzając nowe granice czasowe dla tych procesów. W rozdziale trzecim analizowane jest generowanie spójności za pomocą hamiltonianów, przy czym autor definiuje zdolność generowania spójności jako kluczowy wskaźnik. Rozdział czwarty skupia się na algorytmie Bernsteina-Vaziraniego, badając wpływ spójności, splątania i czystości na jego wydajność. Rozdział piąty poświęcono zasobom w modelach obliczeń kwantowych z ograniczonymi zasobami, w tym w modelu „jednego czystego qubitu”. W rozdziale szóstym autor proponuje protokoły benchmarkingu szumu w skalowalnych obwodach kwantowych, analizując asymetryczne błędy. Rozdział siódmy podsumowuje wyniki badań i wskazuje potencjalne kierunki dalszych prac.

Praca stanowi znaczący wkład w rozwój teorii zasobów kwantowych, dostarczając zarówno teoretycznych, jak i praktycznych narzędzi do ich analizy i optymalizacji.

Przedmiot rozprawy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej Moeina Naseriego pt. "Quantum Resources in Quantum Technologies" jest analiza podstawowych zasobów kwantowych, takich jak spójność kwantowa, splątanie oraz czystość, kluczowych dla rozwoju i optymalizacji technologii kwantowych. Autor bada rolę tych zasobów w różnorodnych zastosowaniach, takich jak obliczenia kwantowe, algorytmy kwantowe, modelowanie szumu w obwodach kwantowych oraz ograniczenia szybkości procesów kwantowych. Głównym celem pracy jest nie tylko dogłębne zrozumienie charakteru i ograniczeń zasobów kwantowych, ale również wypracowanie narzędzi teoretycznych do ich kwantyfikacji, optymalizacji oraz efektywnego wykorzystania.

Rozprawa podejmuje kompleksowe badania nad teoriami zasobów kwantowych, koncentrując się na trzech kluczowych aspektach. Pierwszym z nich jest teoria spójności kwantowej, w ramach której autor wprowadza nową koncepcję zdolności generowania spójności przez hamiltoniany. Autor analizuje maksymalną szybkość, z jaką możliwe jest generowanie spójności w układach kwantowych, co ma istotne znaczenie dla optymalizacji algorytmów kwantowych oraz realizacji procesów wymagających wysokiego stopnia spójności. Badania te są oparte na użyciu względnej entropii spójności jako miernika oraz uwzględniają ograniczenia normy Hilberta-Schmidta dla przestrzeni Hilberta o dowolnych wymiarach.

Drugim istotnym zagadnieniem poruszonym w pracy są ograniczenia szybkości (tzw. quantum speed limits) w transformacjach baz kwantowych oraz generacji zasobów. Autor wprowadza nowe granice czasowe dla jednoczesnych transformacji zbioru stanów kwantowych, takich jak konwersja baz na maksymalnie spójne bazy czy permutacja baz. Szczególną uwagę poświęcono przypadkom systemów wielokubitowych oraz przestrzeni Hilberta o wyższych wymiarach, co umożliwia szersze zastosowanie wyników w technologii kwantowej. Wyniki te stanowią podstawę do bardziej wydajnego zarządzania zasobami w zadaniach obliczeniowych oraz projektowania algorytmów kwantowych.

Kolejnym kluczowym obszarem badań jest analiza roli spójności, splątania oraz czystości w algorytmach kwantowych, takich jak algorytm Bernsteina-Vaziraniego. Autor bada związek między wydajnością algorytmu a początkowymi zasobami kwantowymi, wskazując na sytuacje, w których nadmierne splątanie może obniżyć optymalną wydajność obliczeniową. Badania te dostarczają cennych wskazówek dotyczących projektowania algorytmów kwantowych zoptymalizowanych pod kątem użyteczności dostępnych zasobów.

Rozprawa porusza również tematykę skalowalnych obwodów kwantowych w modelach ograniczonych zasobów. Szczególną uwagę zwraca na model "jednego czystego qubitu" oraz możliwość uzyskiwania przewag obliczeniowych przy minimalnym splątaniu i spójności. Autor analizuje również wpływ zaszumienia bramek kwantowych na wydajność obwodów oraz wprowadza protokół benchmarkingowy

pozwalający na walidację asymetrycznego modelu szumu w układach wielobitowych. Wnioski te są szczególnie ważne w kontekście praktycznej realizacji obliczeń kwantowych w obecności rzeczywistych błędów.

Ocena końcowa i wnioski

Rozprawa podejmuje istotne zagadnienia z zakresu teorii zasobów kwantowych, wnosząc znaczną wartość do współczesnej wiedzy o technologiach kwantowych. Autor z powodzeniem zrealizował założone cele badawcze, co znajduje odzwierciedlenie w klarownej strukturze pracy, logicznie wyprowadzonych wnioskach oraz wysokim poziomem merytorycznym prezentowanych analiz.

Najważniejsze osiągnięcia rozprawy to:

1. *Wprowadzenie nowatorskich granic czasowych dla transformacji baz kwantowych* oraz generacji zasobów. Te wyniki są szczególnie cenne dla optymalizacji procesów kwantowych w kontekście ograniczonych zasobów energetycznych.
2. *Zdefiniowanie zdolności generowania spójności przez hamiltoniany*, co stanowi istotny wkład w teorię zasobów spójności. Analiza ta znajduje zastosowanie w projektowaniu algorytmów wymagających wysokiego poziomu spójności.
3. *Zbadanie wpływu spójności, splątania oraz czystości na algorytmy kwantowe*, takie jak algorytm Bernsteina-Vaziraniego, co pozwala na lepsze zrozumienie relacji między dostępnymi zasobami kwantowymi a wydajnością algorytmów.
4. *Opracowanie protokołów benchmarkingu dla hałasu w obwodach kwantowych*, co ma istotne znaczenie praktyczne w kontekście skalowalności technologii kwantowych i zarządzania błędami w rzeczywistych systemach.

Rozprawa wyróżnia się również solidnym zapleczem teoretycznym, przemyślaną metodologią oraz klarownością wyводу. Prezentowane wyniki zostały opublikowane w renomowanych czasopismach naukowych, co świadczy o ich wysokiej wartości naukowej oraz uznaniu ze strony środowiska naukowego.

Podsumowując, praca doktora Moeina Naseriego w pełni spełnia wymogi stawiane przed rozprawami doktorskimi w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne i wnosząc o przyjęcie jej przez Radę Dyscypliny Nauki fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego, oraz o dopuszczenie do publicznej obrony.

prof. dr hab. Zbigniew Puchała