

dr hab. Jerzy Balicki, prof. ucz.
Zakład Strukturalnych Metod Przetwarzania Wiedzy
Wydział Matematyki i Nauk Informacyjnych
Politechnika Warszawska
ul. Koszykowa 75 p. 403
00-662 Warszawa
e-mail: jerzy.balicki@pw.edu.pl

Gdańsk 10.08.2026 r.



Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Roberta Okuły

pt.: *Quantifying Quantum Information: Relationships between measures in Quantum Cryptography*

Przedmiotem recenzowanej rozprawy doktorskiej pt. „Quantifying Quantum Information: Relationships between measures in Quantum Cryptography” (pol. *Szacowanie informacji kwantowej: relacje między miarami w kryptografii kwantowej*) jest analiza zależności między wybranymi miarami informacji i korelacji kwantowych oraz określenie możliwości ich wykorzystania w kryptografii kwantowej, w szczególności w analizie bezpieczeństwa kwantowej dystrybucji klucza. Doktorant mgr inż. Robert Okuła wykazał się samodzielnością w prowadzeniu badań, a raport Jednolitego Systemu Antyplagiatowego nie wykazał podobieństwa dysertacji napisanej w języku angielskim do innych opracowań. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Piotr Mironowicz, prof.

1. Problem naukowy i teza rozprawy

Rozprawa została przygotowana w języku angielskim i liczy 149 stron. Obejmuje podziękowania, streszczenia w językach polskim i angielskim, wykaz oznaczeń i skrótów, przedmowę, sześć rozdziałów merytorycznych, uwagi końcowe, bibliografię, wykazy rysunków i tabel, indeks oraz dwa dodatki. Konstrukcja pracy odpowiada jej interdyscyplinarnemu charakterowi, łączącemu teorię informacji kwantowej, kryptografię kwantową, teorię korelacji kwantowych i zaawansowane metody optymalizacji.

Główny problem naukowy rozprawy można sformułować jako pytanie, w jaki sposób wybrane miary informacji i korelacji kwantowych są ze sobą powiązane oraz jak zależności te można zastosować do oceny bezpieczeństwa protokołów kryptografii kwantowej i jakości generowanej losowości. Problem rozwinięto w trzech zasadniczych kierunkach badawczych:

- analizie bezpieczeństwa kwantowej dystrybucji klucza w kontekście dekoherencji i kwantowego darwinizmu;
- certyfikacji losowości niezależnej od urządzeń z wykorzystaniem entropii Shannona oraz wybranych klas nierówności Bella;
- badaniu zależności między Nielokalnością Bella a dyskordem kwantowym.

Autor dowodzi, że analiza relacji między miarami informacji i korelacji kwantowych umożliwia opracowanie nowych lub rozszerzonych metod certyfikowania bezpieczeństwa i jakości danych w protokołach kryptografii kwantowej. Problem naukowy dotyczy istotnych zagadnień współczesnej teorii informacji kwantowej. Jego zakres jest szeroki, ale poszczególne części łączy wspólna idea szacowania zasobów kwantowych na podstawie obserwowanych statystyk, entropii i korelacji. Szczególnie ważne jest powiązanie rozważań fundamentalnych z problemami bezpieczeństwa kryptograficznego i certyfikacji losowości.

Doktorant umiejętnie powiązał trzy główne bloki badawcze. Zwłaszcza zależność między kwantowym darwinizmem a bezpieczeństwem QKD oraz związek analizy dyskoru kwantowego z głównym nurtem kryptograficznym są w rozprawie wyjaśnione w sposób jednoznaczny. Można uznać, że mgr Okuła opracował spójną koncepcję badawczą, której wspólnym elementem jest analiza przepływu, dostępności i certyfikowalności informacji kwantowej. Oceniam, że problem naukowy rozprawy został wybrany trafnie, a jego rozwiązanie wymagało wiedzy wykraczającej poza standardowy zakres jednej specjalności.

2. Rozwiązanie problemu naukowego i zastosowane metody badawcze

Autor rozwiązuje postawiony problem poprzez połączenie metod analitycznych, modelowania matematycznego oraz zaawansowanych obliczeń numerycznych. W dysertacji wykorzystano narzędzia teorii informacji kwantowej, teorii prawdopodobieństwa, a także techniki optymalizacji nieliniowej. Istotnym elementem metodologicznym jest również zastosowanie hierarchii Navascuésa–Pironio–Acína (NPA), pozwalającej wyznaczać ograniczenia na korelacje kwantowe i prawdopodobieństwa w scenariuszach niezależnych od urządzeń.

Pierwszy rozdział doktoratu przedstawia formalne podstawy teorii kwantowej, w tym przestrzeń Hilberta, opis stanów i pomiarów kwantowych, operatory i nierówności Bella oraz kwantowe rozkłady prawdopodobieństwa. Doktorant zwięźle omawia najważniejsze miary informacji: entropię Shannona, entropię von Neumanna, min-entropię, entropię Rényiego oraz dyskord kwantowy. Dyscord kwantowy (ang. quantum discord) to miara całkowitych korelacji między dwoma podsystemami, wykraczająca poza splatanie kwantowe. Oznacza to, że pewne stany mogą nie być splątane, ale nadal wykazują korelacje kwantowe mierzone właśnie jako discord. Uzupełnieniem jest prezentacja metod numerycznych, obejmująca optymalizację nieliniową, solwery, programowanie półokreślone i hierarchię NPA. Taka konstrukcja rozdziału wprowadzającego świadczy o właściwym rozpoznaniu narzędzi niezbędnych do rozwiązania sformułowanych problemów.

Rozdział drugi wprowadza podstawy kryptografii kwantowej, kwantowej dystrybucji klucza, podejścia niezależnego od urządzeń oraz generowania, ekstrakcji, wzmacniania i certyfikacji losowości. Przyjęta kolejność prezentacji jest logiczna i przygotowuje aparat pojęciowy wykorzystywany w dalszych częściach rozprawy.

W rozdziałach trzecim i czwartym mgr Robert Okuła precyzyjnie analizuje kwantowy darwinizm, dekoherencję i ich znaczenie dla protokołu BB84. Protokół BB84 to pierwszy kwantowy protokół dystrybucji klucza (QKD), opracowany w 1984 roku przez Charlesa Bennetta i Gillesa Brassarda. Służy on do bezpiecznego przekazywania losowego ciągu bitów między dwiema stronami (Alicją i Bobem) z wykorzystaniem praw mechaniki kwantowej do wykrywania ewentualnego podsłuchu. Doktorant wprowadza model warstwowego środowiska oddziałującego z pojedynczym kubitem oraz prowadzi analizę rozróżnialności stanów. Jest to podejście nietypowe z punktu widzenia standardowej analizy QKD, a przez to interesujące poznawczo. O jego wartości decyduje formalne powiązanie informacji dostępnej w środowisku z bezpieczeństwem protokołu i możliwością rozróżniania stanów przesyłanych przez uprawnionych uczestników komunikacji.

Najbardziej rozbudowaną częścią metodologiczną jest rozdział piąty, poświęcony certyfikacji losowości. Doktorant analizuje certyfikację niezależną od urządzeń, ograniczenia nakładane na prawdopodobieństwa oraz sposoby wyznaczania entropii. Szczególną uwagę poświęca certyfikacji entropii Shannona. Następnie bada właściwości certyfikacyjne wybranych klas nierówności Bella, w tym nierówności CHSH, nierówności Braunsteina–Cavesa, nierówności oznaczonych jako I_1 i I_2 oraz nierówności Woolltortona–Browna–Colbecka. Nierówności CHSH (od nazwisk autorów: Clauser, Horne, Shimony i Holt) weryfikują, czy świat da się opisać za pomocą klasycznych zasad realizmu lokalnego.

W fizyce kwantowej układ dwóch splątanych cząstek łamie te nierówności. Pokazuje to, że przyroda jest nielokalna, a wyniki pomiarów nie są z góry ustalone. W tej części dysertacji mgr inż. Okuła porównuje uzyskane wyniki, wyprowadza ogólną postać obliczeń dla entropii Shannona, rozważa entropię jako funkcję złożoną, uwzględnia dodatkowe ograniczenia oraz rozszerza analizę na scenariusz z trzema wynikami. Szczególnie wartościowym elementem jest zaawansowane poszukiwanie protokołów certyfikacji. Obejmuje ono analizę, wybór szczególnie interesujących protokołów oraz zagadnienie samoweryfikacji urządzeń. Doktorant nie ograniczył się do analizy pojedynczego, wcześniej znanego scenariusza, lecz podjął próbę systematycznego przeszukania większej przestrzeni możliwych rozwiązań.

Rozdział szósty odnosi się do parametryzacji pomiarów oraz metody numerycznego obliczania dyskordu do zbadania relacji między dyskordem kwantowym a nielokalnością Bella. Autor analizuje stany splątane, wartości dyskordu dla kanonicznych nierówności Bella oraz wzorce strukturalne występujące w procesie minimalizacji dyskordu. Jest to zagadnienie trudne obliczeniowo, wymagające zarówno znajomości formalizmu kwantowego, jak i umiejętnego stosowania metod optymalizacyjnych. Dobór metod należy ocenić jako właściwy. Programowanie półokreślone i hierarchia NPA są uznanymi narzędziami w analizie korelacji kwantowych i certyfikacji niezależnej od urządzeń, natomiast optymalizacja nieliniowa jest uzasadniona w problemach parametryzacji pomiarów, obliczania dyskordu i wyznaczania optymalnych protokołów.

Autor przedstawia również istotne szczegóły implementacyjne, takie jak poziomy relaksacji hierarchii NPA, wykorzystane solvery, warunki zatrzymania, sposób inicjalizacji procedur optymalizacyjnych oraz stabilność rozwiązań. Stanowi to dodatkowy argument przemawiający za bardzo wysoką oceną kompetencji metodologicznych mgr Roberta Okuły.

Na podstawie przedstawionej rozprawy stwierdzam, że Autor rozwiązał postawione problemy przy użyciu właściwie dobranych metod oraz wykazał umiejętność samodzielnego projektowania i prowadzenia badań naukowych. Rozprawa świadczy zarówno o biegłości w posługiwaniu się zaawansowanym aparatem matematycznym, jak i o umiejętności konstruowania oraz implementacji złożonych procedur numerycznych.

3. Aktualność i znaczenie tematyki rozprawy

Tematyka rozprawy jest aktualna i ważna zarówno z poznawczego, jak i potencjalnie praktycznego punktu widzenia. Kryptografia kwantowa jest jednym z najbardziej rozwiniętych obszarów technologii kwantowych, a prawidłowe określenie bezpieczeństwa protokołów, jakości generowanej losowości oraz relacji między zasobami kwantowymi pozostaje istotnym problemem badawczym.

Szczególne znaczenie ma podejście niezależne od procesorów kwantowych. Pozwala ono formułować wnioski dotyczące bezpieczeństwa i losowości na podstawie obserwowanych korelacji, bez konieczności pełnego zaufania do wewnętrznej konstrukcji tej klasy komputerów. Z tego powodu nierówności Bella, programowanie półokreślone i hierarchia NPA stanowią ważne narzędzia w badaniach nad kryptografią kwantową i generowaniem certyfikowanej losowości. Certyfikacja losowości jest zagadnieniem o kluczowym znaczeniu dla kryptografii. Bezpieczne protokoły wymagają źródeł losowości, których wyników nie może przewidzieć potencjalny przeciwnik. Rozprawa dotyczy zatem nie tylko abstrakcyjnych właściwości korelacji kwantowych, lecz również jednego z podstawowych zasobów wymaganych przez systemy kryptograficzne.

Interesującym wątkiem jest zastosowanie entropii Shannona do certyfikacji losowości. W kryptografii zazwyczaj wykorzystywana jest min-entropia związana z prawdopodobieństwem odgadnięcia wyniku. Badanie możliwości i ograniczeń certyfikacji opartej na entropii Shannona rozszerza perspektywę informacyjną i może prowadzić do nowych sposobów oceny jakości danych generowanych przez komputery kwantowe.

Równie ważny poznawczo jest problem relacji między wybranymi typami korelacji kwantowych. Splątanie, nielokalność Bella i dyskord kwantowy nie są pojęciami równoważnymi, choć są ze sobą powiązane. Określenie charakteru tych zależności ma znaczenie dla teorii zasobów kwantowych oraz dla projektowania protokołów wykorzystujących zadane własności stanów i pomiarów. Analiza dekoherencji i przepływu informacji do środowiska ma z kolei znaczenie dla rozumienia ograniczeń rzeczywistych systemów kwantowych. Włączenie perspektywy kwantowego darwinizmu do badań nad QKD jest podejściem oryginalnym, pozwalającym spojrzeć na bezpieczeństwo protokołów przez pryzmat dostępności i redundancji informacji w środowisku.

Uważam zatem, że tematyka rozprawy jest nie tylko aktualna, lecz również dostatecznie ważna, aby uzasadnić podjęcie jej w ramach rozprawy doktorskiej. Łączy ona problemy fundamentalne z zagadnieniami istotnymi dla rozwoju bezpiecznych technologii kwantowych.

4. Oryginalny dorobek Doktoranta i jego znaczenie

Na podstawie rozprawy badań można wskazać trzy zasadnicze grupy oryginalnych osiągnięć Autora. Pierwsza grupa osiągnięć dotyczy analizy kwantowej dystrybucji klucza w kontekście dekoherencji i kwantowego darwinizmu. Mgr Okuła zastosował model warstwowego środowiska oddziałującego z pojedynczym kubitem i przeprowadził analizę rozróżnialności stanów w protokole BB84. Takie ujęcie pozwala badać, w jaki sposób informacja o stanie układu staje się dostępna w kolejnych fragmentach środowiska oraz jakie może to mieć konsekwencje dla poufności transmisji. Oryginalność tego podejścia polega na wykorzystaniu koncepcji kwantowego darwinizmu, tradycyjnie odnoszonej do problemu wyłaniania się klasyczności, w analizie bezpieczeństwa kryptograficznego. Wynik ten ma znaczenie poznawcze i może stanowić interesujące rozszerzenie standardowych modeli QKD.

Druga, najobszerniejsza grupa osiągnięć dotyczy certyfikacji losowości dla entropii Shannona. Doktorant opracował metody wyznaczania ograniczeń na rozkłady prawdopodobieństwa, obliczania certyfikowanej entropii oraz analizy zależności między wartością naruszenia nierówności Bella a ilością certyfikowanej losowości. Istotną wartość ma przeprowadzenie porównania wybranych klas nierówności Bella. Pozwala ono określić, które scenariusze i struktury nierówności są szczególnie użyteczne w certyfikacji losowości. Autor rozszerzył analizę na dodatkowe ograniczenia i scenariusze z większą liczbą wyników, a także sformułował ogólne podejście do certyfikacji entropii Shannona. Za szczególnie wartościowe należy uznać szeroko zakrojone poszukiwanie protokołów certyfikacji. Stanowi to istotny oryginalny wkład w rozwój metod certyfikacji losowości niezależnej od procesorów kwantowych. Osiągnięcie to ma znaczenie zarówno metodologiczne, jak i potencjalnie praktyczne.

Trzecia grupa wyników dotyczy zależności między nielokalnością Bella a dyskordem kwantowym. Mgr Robert Okuła przeprowadził analizę numeryczną dla wybranych stanów splątanych i kanonicznych nierówności Bella oraz zidentyfikował wzorce strukturalne występujące podczas minimalizacji dyskordu. Wyniki te pozwalają lepiej zrozumieć relację między różnymi rodzajami nieklasycznych korelacji. Znaczenie tego osiągnięcia jest przede wszystkim poznawcze. Dyskord i nielokalność opisują wybrane własności układów kwantowych, dlatego scharakteryzowanie zależności między nimi może przyczynić się do lepszego uporządkowania teorii zasobów kwantowych.

Oryginalny dorobek Autora obejmuje także opracowanie i implementację procedur numerycznych opartych na programowaniu nieliniowym i półokreślonym. W problemach o tak dużej złożoności adekwatne sformułowanie zagadnienia optymalizacyjnego, dobór ograniczeń i zapewnienie stabilności obliczeń stanowią ważny element pracy badawczej.

Na podstawie dostępnych informacji oceniam dorobek przedstawiony w rozprawie jako oryginalny, wielowątkowy i wartościowy. Obejmuje on zarówno rozwój metod, jak i nowe

wyniki dotyczące bezpieczeństwa, certyfikacji losowości oraz relacji między miarami korelacji kwantowych. Zakres i poziom tych osiągnięć uzasadniają bardzo wysoką ocenę rozprawy.

Podczas autoreferatu na obronie publicznej oczekiwałamby dodatkowo od Doktoranta przedstawienie oryginalnych osiągnięć w formie możliwie precyzyjnej listy, zgodnej z deklaracją Autora zawartą w przedmowie oraz uwagach końcowych. Konieczne również będzie odniesienie się mgra Okuły do publikacji, w których przedstawiono poszczególne wyniki, oraz indywidualnego wkładu Autora w prace z promotorem.

5. Ocena wiedzy mgra Okuły i jego kompetencji naukowych

Rozprawa świadczy o szerokiej i pogłębionej wiedzy Autora z zakresu teorii informacji kwantowej, mechaniki kwantowej, kryptografii kwantowej, teorii prawdopodobieństwa oraz technik optymalizacji. Doktorant swobodnie posługuje się formalizmem przestrzeni Hilberta, stanów i pomiarów kwantowych, operatorów Bella oraz kwantowych rozkładów prawdopodobieństwa. Wykazuje znajomość miar informacji, w tym entropii Shannona, entropii von Neumanna, min-entropii, entropii Rényiego i dyskoru kwantowego. Zakres ten jest odpowiedni dla problematyki rozprawy i wskazuje na dobre przygotowanie teoretyczne.

Wiedza mgra Roberta Okuły nie ogranicza się do podstaw formalizmu kwantowego. Rozprawa obejmuje również zagadnienia dekoherencji, kwantowego darwinizmu, niezależności od urządzeń, certyfikacji losowości, samoweryfikacji urządzeń oraz nielokalności Bella. Są to zagadnienia zaawansowane, wymagające znajomości zarówno klasycznych wyników teorii informacji kwantowej, jak i jej współczesnych kierunków rozwoju. Na szczególne podkreślenie zasługują kompetencje matematyczne i obliczeniowe Doktoranta. W pracy wykorzystano optymalizację nieliniową, programowanie półokreślone i hierarchię NPA. Zastosowanie tych metod wymaga nie tylko znajomości odpowiednich narzędzi informatycznych, lecz przede wszystkim umiejętności prawidłowego sformułowania funkcji celu, ograniczeń i relaksacji problemu.

Eksperymenty numeryczne, analiza wielu nierówności Bella, poszukiwanie protokołów certyfikacji oraz badanie minimów dyskoru świadczą o umiejętności samodzielnego projektowania procedur badawczych i interpretowania rezultatów o dużej złożoności. Autor wykazuje także umiejętność łączenia wiedzy z kilku obszarów. W szczególności stosuje koncepcje kwantowego darwinizmu do analizy problemów kryptograficznych oraz zestawia nielokalność Bella z dyskoru kwantowym. Takie podejście wymaga dojrzałości naukowej i zdolności do dostrzegania związków między pozornie odrębnymi problemami.

Stwierdzam zatem, że rozprawa potwierdza posiadanie przez Doktoranta wiedzy na zaawansowanym poziomie, zarówno o charakterze podstawowym dla dyscypliny, jak i szczegółowym, odpowiadającym obszarowi prowadzonych badań. Mgr inż. Rober Okuła wykazał umiejętność samodzielnego formułowania problemów, doboru metod, przeprowadzania analiz oraz wyciągania wniosków naukowych.

6. Uwzględnienie najnowszych osiągnięć nauki i znajomość literatury

Rozprawa obejmuje szeroki zakres zagadnień z teorii informacji i kryptografii kwantowej. Jej struktura wskazuje, że Doktorant odwołuje się zarówno do fundamentalnych wyników dotyczących entropii, nierówności Bella, kwantowej dystrybucji klucza i dekoherencji, jak i do współczesnych badań nad certyfikacją niezależną od urządzeń, hierarchią NPA, samoweryfikacją urządzeń i relacjami między zasobami kwantowymi. Bibliografia zajmuje 20 stron, od strony 119 do strony 138, i dotyczy 210 pozycji źródłowych, w tym 3 prac własnych. Jej objętość wskazuje na rozległą kwerendę literaturową. Sam rozmiar bibliografii nie jest oczywiście wystarczającym kryterium oceny, jednak zakres

problematyki przedstawionej w rozdziałach teoretycznych i badawczych pozwala stwierdzić, że Doktorant dobrze orientuje się w literaturze przedmiotu.

Pozytywnie należy ocenić uwzględnienie wielu klas nierówności Bella, w tym zarówno klasycznej nierówności CHSH, jak i bardziej wyspecjalizowanych rodzin nierówności. Świadczy to o tym, że mgr Okuła nie ograniczył analizy do najbardziej podstawowego scenariusza, lecz uwzględnił szerszy kontekst badań nad nielokalnością i certyfikacją losowości. W cytowanej literaturze przedmiotu uwzględniono najważniejsze publikacje „konkurencyjnych” zespołów, co świadczy o tym, że Autor wyraźnie oddziela stan wiedzy od własnych osiągnięć. Równie istotne jest odniesienie do metod programowania półokreślonego i hierarchii Navascuésa–Pironio–Acína, stanowiących podstawowe narzędzia analizy korelacji kwantowych. Uwzględnienie problematyki *self-testingu*, certyfikacji niezależnej od urządzeń oraz wielowynikowych scenariuszy pomiarowych również świadczy o znajomości aktualnych kierunków badań.

Cytowane trzy publikacje Autora stanowią spójny i wartościowy cykl, dobrze odpowiadający głównym wątkom rozprawy. Praca R. Okuła, P. Mironowicz, „How decoherence affects the security of BB84 quantum key distribution protocol”, *Quantum Information Processing*, 2025, podejmuje interesujące i stosunkowo nietypowe ujęcie bezpieczeństwa protokołu BB84 poprzez analizę dekoherencji w ramach kwantowego darwinizmu. Autorzy badają, w jaki sposób informacja o wynikach pomiaru może propagować się do środowiska i potencjalnie stać się dostępna dla przeciwnika, także w kontekście kanałów bocznych. Szczególnie wartościowe jest powiązanie organizacji warstwowej środowiska z możliwością ograniczenia wycieku informacji. Publikacja stanowi więc oryginalne połączenie zagadnień fundamentalnych z problematyką bezpieczeństwa QKD.

Praca R. Okuła, P. Mironowicz, „Device-independent Shannon entropy certification”, *New Journal of Physics*, 2025, jest bardzo istotna z punktu widzenia głównego nurtu rozprawy. Autorzy rozwijają problem niezależnej od urządzeń certyfikacji losowości, wykorzystując jako miarę entropię Shannona, podczas gdy wcześniejsze prace koncentrowały się przede wszystkim na min-entropii i entropii von Neumanna. Analizują przydatność różnych nierówności Bella w obecności szumu i pokazują potencjalne korzyści wynikające z zastosowania entropii Shannona. Praca ma zarówno znaczenie teoretyczne, jak i metodologiczne dla certyfikacji losowości kwantowej.

Natomiast praca R. Okuła, P. Mironowicz, „Extensive search of Shannon entropy-based randomness certification protocols”, arXiv:2511.22771, 2025 stanowi naturalne rozwinięcie poprzedniego artykułu. Autorzy przeprowadzili systematyczne badanie ponad pół miliona wyrażeń Bella dla konfiguracji z czterema ustawieniami pomiarowymi jednej strony i trzema drugiej, identyfikując szczególnie interesujące protokoły pod względem certyfikowanej entropii i odporności na szum. Dodatkowym walorem jest rozszerzenie analizy o *self-testing* korelacji kwantowych. Skala obliczeń oraz systematyczność poszukiwania świadczą o dojrzałości metodologicznej i stanowią mocne uzupełnienie wyników z rozprawy.

Łącznie dorobek ten należy ocenić bardzo pozytywnie. Dwie publikacje ukazały się w recenzowanych czasopismach naukowych, natomiast trzecia jest obszernym preprintem rozwijającym wcześniejsze wyniki. Co szczególnie istotne dla oceny rozprawy doktorskiej, publikacje nie są luźno związane z jej tematyką, lecz odpowiadają bezpośrednio jej głównym oryginalnym osiągnięciom: analizie bezpieczeństwa QKD oraz certyfikacji losowości opartej na entropii Shannona.

Na podstawie przedstawionych informacji oceniam znajomość literatury przez Doktoranta wysoko. Rozprawa obejmuje zarówno klasyczne podstawy dyscypliny, jak i współczesne metody i problemy badawcze. Mgr Okuła potrafi wykorzystać dorobek

literaturowy nie tylko do przedstawienia stanu wiedzy, lecz także jako punkt wyjścia do formułowania i rozwiązywania własnych problemów naukowych.

7. Wady i słabe strony rozprawy

Praca obejmuje trzy rozbudowane bloki badawcze: analizę dekoherencji i QKD w kontekście kwantowego darwinizmu, certyfikację losowości oraz relację między dyskordem a Nielokalnością. Zakres ten jest wartościowy, jednak wymaga bardzo wyraźnego wskazania wspólnej tezy łączącej wszystkie części. W przeciwnym przypadku rozprawa może być odbierana jako zbiór kilku wartościowych, ale częściowo niezależnych badań. Warto szczególnie mocno podkreślić wspólną ideę szacowania informacji kwantowej i relacji między jej miarami.

Nieco mniejszej wagi kwestia dotyczy związku kwantowego darwinizmu z bezpieczeństwem kryptografii kwantowej. Jest to podejście interesujące i oryginalne, ale Doktorant powinien jednoznacznie oddzielić dekoherencję wynikającą z fizycznego szumu kanału, przepływ informacji do środowiska i aktywne działania przeciwnika. Wymaga również wykazania, że wykorzystanie koncepcji kwantowego darwinizmu prowadzi do wniosków wykraczających poza standardową analizę kanałów kwantowych.

Pewna drobna uwaga dotyczy charakteru wyników przedstawionych w rozdziale szóstym. Należy wyraźnie odróżnić zależności udowodnione analitycznie od korelacji i wzorców zidentyfikowanych numerycznie. Obserwacje numeryczne mogą mieć dużą wartość poznawczą, lecz ich zakres obowiązywania powinien być formułowany ostrożnie. Wskazane jest również omówienie, czy zaobserwowane zależności można rozszerzyć poza badaną klasę stanów i nierówności Bella.

Przedstawione uwagi mają w większości charakter doprecyzowujący i nie podważają zasadniczej wartości naukowej rozprawy. Nie wskazują one na fundamentalne błędy metodologiczne ani na brak oryginalnych osiągnięć. Przeciwnie, wynikają głównie z szerokiego zakresu badań oraz wysokiego stopnia złożoności analizowanych zagadnień. Warto podkreślić, że rozprawa napisana jest niezwykle starannie. Nie występują w niej istotne błędy stylistyczne.

8. Podsumowanie i konkluzja

Podsumowując, rozprawę oceniam bardzo wysoko. Mgr inż. Robert Okuła podjął aktualne, trudne i ważne problemy naukowe, wykorzystał właściwy i zaawansowany aparat badawczy oraz uzyskał oryginalne wyniki o znaczeniu poznawczym i potencjalnej przydatności dla kryptografii kwantowej. Zakres osiągnięć, ich poziom teoretyczny i metodologiczny oraz szerokość przeprowadzonych badań stanowią podstawę do sformułowania bardzo pozytywnej oceny rozprawy. Problematyka ta uwzględniana jest w literaturze przedmiotu w niewielkim jeszcze zakresie, a potrzeby rozwoju tego rodzaju modeli systematycznie się zwiększają. W związku z tym rozszerzanie wiedzy w tym obszarze oraz rozwijanie nowych narzędzi programistycznych słusznie jest przedmiotem dociekań naukowych i projektów badawczych.

Przydatność rozprawy dla dziedziny nauk inżynierijno-technicznych jest zatem ewidentna ze względów poznawczych, a także aplikacyjnych. Bardzo wysoko oceniam oryginalne osiągnięcia naukowo-badawcze przedstawione w recenzowanej pracy. Dysertacja stanowi ważny krok w rozwoju informatyki, w tym informatycznych obliczeń kwantowych i kryptografii.

Konkluzja

Podsumowując, stwierdzam, że praca mgr inż. Roberta Okuły zatytułowana „*Quantifying Quantum Information: Relationships between measures in Quantum*

Cryptography” (Szacowanie informacji kwantowej: relacje między miarami w kryptografii kwantowej) spełnia wymagania przewidziane dla rozpraw doktorskich w art. 187 w ramach Prawa o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2024 poz. 1571). Dlatego, stawiam wniosek o przyjęcie tej pracy jako rozprawy doktorskiej oraz o dopuszczenie mgra inż. Roberta Okuły do publicznej obrony.

Wniosek o wyróżnienie rozprawy

Ze względu na umiejętne i zaawansowane podjęcie tematyki związanej z modelowaniem problemów kryptografii kwantowej, nagradzając innowacyjność dysertacji, pragnę zgłosić wniosek o wyróżnienie ww. rozprawy. Uważam, że wydane publikacje, otrzymane rezultaty, ich bardzo duży potencjał aplikacyjności, wykonanie pracochłonnych symulacji, poziom trudności i sposób napisania pracy w pełni to uzasadnia.

