



UNIWERSYTET  
JAGIELLOŃSKI  
W KRAKOWIE

Dr hab. Kamil Korzekwa  
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki  
Stosowanej  
Uniwersytet Jagielloński  
Ul. Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków  
kamil.korzekwa@uj.edu.pl

Kraków, 22 VII 2023

## Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Pauliny Lewandowskiej pt. “Metody walidacji współczesnych architektur kwantowych”

### Uwagi wstępne

Recenzowana rozprawa napisana jest w języku angielskim i składa się ze 179 stron w 9 rozdziałach i 3 dodatkach. Zawartość pierwszych trzech rozdziałów obejmuje wprowadzenie do tematu (wstęp, narzędzia matematyczne oraz omówienie najważniejszych pojęć i problemów w teorii kwantowej informacji), natomiast kolejne rozdziały skupiają się na wynikach, które są oryginalnym wkładem Autorki w dyscyplinę naukową. Wyniki prezentowane w rozprawie zostały opublikowane w dwóch czasopismach recenzowanych (o wysokiej nocie ministerialnej 140 punktów) oraz jako jeden pre-print (aktualnie w recenzji w topowym piśmie za 200 punktów ministerialnych):

1. P. Lewandowska, A. Krawiec, R. Kukulski, Ł. Paweła, Z. Puchała  
*On the optimal certification of von Neumann measurements*  
Scientific Reports **11**, 3623 (2021)  
DOI: 10.1038/s41598-021-81325-1 arXiv: 2009.06776.
2. P. Lewandowska, R. Kukulski, Ł. Paweła, Z. Puchała  
*Storage and retrieval of von Neumann measurements*  
Physical Review A **106**, 052423 (2022)  
DOI: 10.1103/PhysRevA.106.052423
3. K. Jałowiecki, P. Lewandowska, Ł. Paweła  
*PyQBench: a Python library for benchmarking gate-based quantum computers*  
arXiv:2304.00045 (2023)  
W trakcie recenzji w SoftwareX

Należy także nadmienić, że poza powyższymi pracami, Autorka rozprawy podczas swoich studiów doktorskich opublikowała także dwie inne prace w dziedzinie informacji kwantowej (140 i 40 punktów ministerialnych) oraz dwie publikacje w wydawnictwach pokonferencyjnych.

### Przedmiot rozprawy i jej wartość naukowa

Głównym celem recenzowanej rozprawy jest stworzenie nowatorskich metod walidacji istniejących urządzeń kwantowych zarówno od strony teoretycznej, jak i praktycznej.

Rozdział 1 zawiera zwięzłe wprowadzenie w tematykę technologii kwantowych, aktualnego stanu ich

rozwoju i ograniczeń oraz, przede wszystkim, szczegółowe omówienie istniejących metod ich walidacji i certyfikacji. Przegląd literaturowy jest zrobiony porządnie, z uwzględnieniem stanu wiedzy nt. współczesnych platform kwantowych typu NISQ (noisy intermediate scale quantum, z ang. zaszumionych urządzeń kwantowych pośredniej skali). Po zarysowaniu tego aktualnego krajobrazu technologicznego i naukowego, Autorka umieszcza swoje badania w tym kontekście, streszczając pokrótce własne podejście do problemu walidacji i metody jego zaadresowania oparte na rozróżnianiu i certyfikacji pomiarów kwantowych.

W Rozdziale 2 Autorka krok po kroku wprowadza narzędzia matematyczne wykorzystywane w informatyce kwantowej. Rozdział ten jest przygotowany z wielką starannością, notacja, definicje i najważniejsze twierdzenia wprowadzane są krok po kroku. Dzięki temu, po pierwsze, czytelnik niezaznajomiony z tematyką może zbudować bazę teoretyczną potrzebną do zrozumienia rozprawy; a po drugie, dowody oryginalnych twierdzeń Autorki otrzymywane w późniejszych sekcjach są o wiele bardziej przejrzyste.

Rozdział 3 jest ostatnim z serii rozdziałów wprowadzających i zawiera fizyczną (kwantowo-informatyczną) nadbudowę nad formalizmem matematycznym z Rozdziału 2. Autorka tłumaczy tu w jaki sposób formalizm matematyczny opisuje stany obiektów kwantowych, ich transformacje (ewolucję czy przetwarzanie) oraz pomiary. Wprowadza także miary odległości pomiędzy tymi obiektami oparte o wierność kwantową (służące później jako miary sukcesu badanych algorytmów kwantowych), a także pokrótce omawia teorię obwodów kwantowych.

Rozdział 4 to już oryginalny wkład Autorki w tę rozprawę. Bada Ona w nim problem uczenia się (typu przechowywanie i odtwarzanie) pomiaru kwantowego (dokładniej: pomiaru von Neumanna) w przypadku  $N \rightarrow 1$ , tj. w jaki najlepszy sposób, mając dostęp do  $N$  czarnych skrzynek wykonujących nieznany pomiar kwantowy, skonstruować obwód kwantowy, który jest w stanie nauczyć się tego pomiaru i odtworzyć go jeden raz w dowolnym późniejszym czasie. Istotnym jest tu fakt, że taki schemat uczenia się może być wykorzystany do stworzenia metody walidacji opartej na estymacji wierności. Autorka znalazła tu optymalne skalowanie z  $N$  funkcji wierności pomiędzy nauczonym a odtwarzanym pomiarem w przypadku asymptotycznym dla dużych  $N$ . Dowód jej bazował na niezależnym wyprowadzeniu ograniczenia górnego i dolnego tejże wierności i pokazaniu, że asymptotycznie są one równe. Ograniczenie z góry zostało dowiedzione przez adaptację wcześniejszych wyników dotyczących uczenia się operacji unitarnych, natomiast ograniczenie z dołu wyprowadzono pomysłowo wykorzystując znany protokół wieloportowej teleportacji kwantowej. Uzyskany w efekcie wynik analityczny uważam za spore osiągnięcie naukowe Autorki, co potwierdza jego opublikowanie w szanownym amerykańskim piśmie *Physical Review A*. Autorka pokazała ponadto, iż schemat uczenia asymptotycznie optymalny nie musi taki być dla małych  $N$ , wprowadziła więc dodatkowo nowy schemat uczenia, który dla tych wartości osiąga lepszą wierność kwantową. Przeprowadziła także optymalizację numeryczną w poszukiwaniu najlepszego schematu dla małych  $N$  i przedstawiła analizę porównawczą ze swoimi wynikami analitycznymi.

W Rozdziale 5 Autorka rozważa potencjalne usprawnienie w działaniu schematu uczenia się pomiaru

kwantowego przy wykorzystaniu kwantowego zasobu jakim jest nieokreślony porządek czasowy. Autorka pokazuje najpierw analitycznie, iż w przypadku kubitów (2-poziomowych układów kwantowych) i uczenia się  $2 \rightarrow 1$ , taki zasób nie przynosi poprawy wierności kwantowej. Jednak następnie stawia hipotezę i prezentuje numeryczne wyniki sugerujące, że w przypadku  $N \rightarrow 1$  dla  $N > 2$  taka poprawa istotnie występuje. Wynik ten uważam za dość intrygujący, dlatego że łączy on ze sobą dwa bardzo aktualne tematy badawcze, tj. z jednej strony schematy kwantowego uczenia, a z drugiej wciąż bardzo świeży pomysł wykorzystania nieokreślonego porządku czasowego jako zasobu kwantowego usprawniającego działanie kwantowych algorytmów.

Pierwsza część Rozdziału 6, dotyczącego problemu rozróżniania pomiarów kwantowych, oparta jest o artykuł naukowy, którego Autorka nie jest współautorką, jednak w drugiej części tego rozdziału Autorka wykorzystuje wyniki tam przedstawione by analitycznie znaleźć optymalny schemat rozróżniania kubitowych pomiarów kwantowych z pewnego szczególnego zbioru (tj. ze sparametryzowanej rodziny pomiarów Fourierowskich). O ile problem ten sam w sobie może nie wydawać się zbyt fascynujący, o tyle jego dogłębne zbadanie przez Autorkę jest dobrze uzasadnione tym, iż w kolejnym Rozdziale 7 otrzymane wyniki wykorzystywane są do stworzenia nowej metody walidacji urządzeń kwantowych.

Rozdział 7 zawiera opis inżynierskiej części pracy, w której Autorka przedstawia stworzoną przez siebie platformę open-source PyQBench, służącą do walidacji istniejących na rynku urządzeń kwantowych. Metoda walidacji oparta jest na protokole rozróżniania pomiarów kwantowych z Rozdziału 6, który jednak musiał zostać zaadaptowany z powodu ograniczeń sprzętowych aktualnych architektur kwantowych (tj. braku możliwości wykonywania operacji kwantowych warunkowanych wynikiem pomiaru). Po przedstawieniu dwóch metod adaptacji, Autorka przystępuje do opisu funkcjonalności i architektury stworzonego przez siebie oprogramowania. Na koniec, przedstawia wyniki walidacji przeprowadzonej na 27-kubitowej maszynie Kolkata firmy IBM. Uważam, iż bardzo pozytywnym aspektem tego rozdziału jest jego strona praktyczna, tj. fakt, iż metody walidacji opracowane przez Autorkę zostały wykorzystane na najnowocześniejszym istniejącym sprzęcie kwantowym.

Rozdział 8 traktuje o kolejnej metodzie walidacji urządzeń kwantowych opartej na certyfikacji pomiarów kwantowych. Po przedstawieniu istniejących wyników dotyczących certyfikacji stanów kwantowych i kanałów unitarnych, Autorka przedstawia główny wynik teoretyczny tego rozdziału w postaci Twierdzenia 12. Określa ono prawdopodobieństwo sukcesu (czyli efektywność) optymalnego schemat dwuelementowej certyfikacji pomiarów kwantowych. Podobnie jak w przypadku Rozdziału 4, uzyskany tu wynik analityczny uważam za spore osiągnięcie naukowe Autorki, co także potwierdza jego opublikowanie w piśmie Scientific Reports. Następnie Autorka opisuje metodę walidacji opartą o otrzymany wynik oraz przedstawia jej realizację na 27-kubitowej maszynie Kolkata firmy IBM przy wykorzystaniu własnej platformy PyQBench.

Rozprawa kończy się Rozdziałem 9, zwięźle podsumowującym pracę, po którym znajdują się jeszcze trzy dodatki. Pierwszy z nich zawiera techniczne dowody twierdzeń z Rozdziału 4, drugi dodatkowe szczegóły dotyczące platformy PyQBench, trzeci zaś dodatkowe obliczenia do Rozdziału 8.

## Uwagi krytyczne

Najpoważniejszym zarzutem jaki można podnieść względem recenzowanej rozprawy (który jednak nie wpływa na jej wartość merytoryczną) są pewne problemy redakcyjne. Język angielski, mimo iż w przeważającej części pracy poprawny, nierzadko używany jest w gramatycznie niepoprawnych formach, nie brak także literówek. Pojawiają się także inne redakcyjne problemy, takie jak nieprawidłowe odnośniki do równań i sekcji, omyłkowe podpisy pod rycinami, czy błędne użycie symboli matematycznych. Oczywiście dla specjalisty czytającego recenzowaną rozprawę wymagane korekty są oczywiste i nie utrudniają zrozumienia pracy, jednak dla początkującego czytelnika chcącego zaznajomić się z tą tematyką badawczą takie błędy mogą stanowić utrudnienie w zrozumieniu materiału. Pozostaje więc pewien żal, gdyż przy niewielkim nakładzie pracy (np. przeczytaniu całej pracy przez jednego z promotorów przed jej złożeniem), można było znacząco podnieść wartość estetyczną tej bardzo dobrej merytorycznie pracy.


Pozostałą, także niezbyt znaczącą, uwagą techniczną jest, iż Rozdział 5 pozostawia zainteresowanego czytelnika z lekkim niedosytem. Mianowicie, Autorka wprowadza i używa całkiem wyrafinowanego oraz skomplikowanego formalizmu do opisu nieokreślonego porządku przyczynowego, a jej celem jest zbadanie, w jaki sposób taki nieokreślony porządek przyczynowy może usprawnić algorytmy uczenia się pomiarów von Neumanna w przypadku  $N \rightarrow 1$  dla dużych  $N$  (przypadek asymptotyczny). Mimo tak postawionego celu oraz ogólnego sformułowania matematycznego tego problemu, razem z przedstawieniem konkretnych narzędzi do jego rozwiązania, Autorka analitycznie rozwiązuje tylko przypadek  $N = 2$  (gdzie nieokreślony porządek przyczynowy nie daje żadnych usprawnień) i analizuje numerycznie przypadki  $N \in \{3, 4, 5\}$  (gdzie pojawia się usprawnienie). Czytelnik zostaje zatem przekonany, że nieokreślony porządek przyczynowy może być przydatnym zasobem kwantowym, jednak pozostaje bez pełnego zrozumienia tego problemu. Sytuacja ta nie jest oczywiście nietypowa w przypadku rozpraw doktorskich, zwłaszcza gdy adresują one najnowsze i najświeższe problemy z danej dziedziny.

## Ocena końcowa

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy jednego z najbardziej aktualnych i palących problemów badawczych na pograniczu informatyki, fizyki i nauk inżynierskich, tj. problemów walidacji nowopowstałych urządzeń kwantowych. Autorka mierzy się z tym problemem zarówno od strony teoretycznej (opracowując nowatorskie metody walidacji architektur kwantowych i badając ich teoretyczną wydajność), jak i inżynierskiej (tworząc innowacyjną platformę open-source PyQBench, pozwalającą na wykorzystanie opracowanych metod do walidacji istniejących na rynku prototypowych urządzeń kwantowych, stworzonych przez światowych gigantów technologicznych IBM i Amazon). Nie ma więc wątpliwości, że tematyka badawcza rozprawy jest bardzo "na czasie", a podejście do problemu jest kompleksowe. Autorka bardzo sprawnie wykorzystywała zaawansowane metody kwantowej informacji oraz techniki optymalizacyjne do rozwiązania postawionych sobie problemów badawczych, a także wykazała

się sprawnością programistyczną i projektową przy tworzeniu platformy PyQBench. W szczególności, rozwiązania problemów przedstawionych w Rozdziale 4 (znalezienie asymptotycznie optymalnej wydajności algorytmów uczących się pomiarów von Neumanna) oraz 8 (certyfikacja pomiarów von Neumanna i jej wykorzystanie do walidacji urządzeń kwantowych) stanowią oryginalny, a zarazem znaczący, wkład Autorki w rozwój informatyki. Ponadto, wyniki zaprezentowane w Rozdziale 7 mają bardzo praktyczny charakter, pozwalający na bezpośrednie testowanie aktualnie powstających architektur kwantowych. Całokształt pracy, a więc bardzo porządnie przygotowany wstęp matematyczny oraz wprowadzenie do informatyki kwantowej, a także wykorzystanie tych narzędzi do rozwiązania istotnych problemów w dalszej części pracy, świadczy o dogłębnej wiedzy Autorki w zakresie informatyki kwantowej. Podsumowując, oceniam recenzowaną rozprawę doktorską jako bardzo dobrze spełniającą wszelkie wymagania stawiane tego typu pracom.

**Ja, niżej podpisany stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr Pauliny Lewandowskiej spełnia wymagania ustawowe stawiane pracom doktorskim w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja, i wnioskuje o przyjęcie jej przez Radę Naukową Instytutu Informatyki Teoretycznej i Stosowanej Polskiej Akademii Nauk w Gliwicach, oraz o dopuszczenie do publicznej obrony.**



Dr. hab. Kamil Korzekwa