

dr hab. inż. Jerzy Balicki, prof. uczelni  
Zakład Strukturalnych Metod Przetwarzania Wiedzy  
Wydział Matematyki i Nauk Informatycznych  
Politechnika Warszawska  
ul. Koszykowa 75  
00-662 Warszawa

Warszawa, 14.09.2022 r.

## Recenzja

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pt.: „*Kwantowe metody obliczeniowe w hybrydowych klasyczno-kwantowych systemach rekomendacyjnych*”, której autorem jest mgr inż. Marek Wróblewski. Promotorem rozprawy jest Pan dr hab. inż. Marek Sewerwain, prof. Uniwersytetu Zielonogórskiego.

### 1. Tematyka rozprawy

Rozprawa umiejscowiona jest tematycznie w obszarze kwantowej sztucznej inteligencji, lub szerzej w obszarze informatyki kwantowej, a całość tej niewątpliwie bardzo interesującej i aktualnej problematyki należy do dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Badania nad kwantowo-inspirowanymi systemami rekomendacji są be wątpienia niezwykle istotne nie tylko z poznawczego, ale także z komercyjnego punktu widzenia.

Opiniowana rozprawa doktorska, która jest napisana w języku polskim na 151 stronach, składa się z wstępu, czterech głównych rozdziałów merytorycznych oraz podsumowania. Ponadto zamieszczono cztery rozdziały szczegółowo wyjaśniające zasady informatyki kwantowej oraz przeprowadzonych eksperymentów. Rozprawę kończy wykaz symboli, skrótów i jednostek, a także abstrakt w języku angielskim oraz bibliografia.

Zgodnie z przyjętą metodologią weryfikuje się hipotezę, że opracowana metoda pozwala na pełną realizację zadań rekomendacyjnych w systemach klasy Big Data, redukując nakłady pamięciowe oraz czas pracy systemu. W tym celu Autor prawidłowo opracował piętnaście zadań prowadzących do efektywnej oceny poprawności hipotezy, w tym skonstruowanie kwantowej bazy danych, opracowanie obwodu kwantowego czy eksperymenty w chmurze IBM Quantum z wykorzystaniem pakietu programistycznego Qiskit oraz symulatora QASM.

Pan mgr inż. Marek Wróblewski w swojej rozprawie doktorskiej zamieścił również interesujące wyniki symulacji nad zastosowaniem kwantowo inspirowanych systemów

rekomendacji. Powyższe podejście może mieć zastosowanie również do wyznaczania rekomendacji w wielu komercyjnych systemach. Ze względu na fakt, że nie są dostępne jeszcze w krajowej literaturze przedmiotu wyniki badań w tym zakresie, to można uznać, że właśnie tę „lukę” wypełnia opiniowana dysertacja.

Część ważnych wyzwań podejmowanych w ramach kwantowo inspirowanych systemów rekomendacji znajduje oddźwięk w dysertacji. Doktorant opracował system rekomendacji wykorzystujący kwantową bazę danych oraz kwantowy algorytm  $k$ -najbliższych sąsiadów. W celu ilustracji zalet i wad skonstruowanej metody opracowano aplikację wykorzystującą procesory kwantowe.

Swoje tezy Autor wspiera za pomocą odnośników do 165 źródeł literaturowych z aktualnej dla podejmowanej tematyki i reprezentatywnej literatury przedmiotu.

## 2. Walory pracy

Rozprawa jest bardzo przejrzysto napisana w kontekście prezentacji aktualnego stanu wiedzy związanego z kwantowo inspirowanymi systemami rekomendacji, a także prezentacji kwantowego profilowania użytkowników. Kluczową zaletą przetwarzania danych z zastosowaniem kwantowego rejestru  $n$ -bitowego jest jednoczesne przetwarzanie  $2^n$  możliwych stanów, co może się wiązać z efektywnym rozwiązywaniem problemów rekomendacji. Wskazuje to na wagę uprawianej problematyki.

Istotnym walorem pracy jest drugi rozdział o kwantowych metodach obliczeniowych, w którym Doktorant w interesujący i świadczący o dobrej znajomości rzeczy sposób opisuje *state\_of\_the\_art* interdyscyplinarnego obszaru badawczego na styku informatyki i mechaniki kwantowej. Autor sięga do najważniejszych i aktualnych publikacji dotyczących tematyki doktoratu, w tym opisów superpozycji i splątania stanów kwantowych, a także ich pomiarów, które w praktyce powodują ich uszkodzenia. Umiejętnie stosując notację Diraca, Autor interesująco zilustrował również alternatywny opis stanów bitu kwantowego za pomocą sfery Blocha, wykorzystując oprogramowanie IBM Qiskit. Kompetentnie stosuje również rachunek tensorowy do wyjaśnienia zjawiska splątania stanów z wykorzystaniem rozkładu Schmidta. Precyzyjnie wyjaśnia szczegóły bramek kwantowych, w tym odwracalność kierunków obliczeń. Zaletą tego rozdziału są ilustracje stanów kubitu po wykonaniu na nim operacji Hadamarda, Pauliego czy rotacyjnych. Zdefiniowano również bramki wielokubitowe: CNOT, Toffoliego, SWAP i Friedkina. Słusznie również przypomniano procedurę klasyfikacji nadzorowanej  $k$ -najbliższych sąsiadów oraz algorytm Grovera do wyszukiwania obiektów

z nieustrukturyzowanej bazy danych. W rezultacie Doktorant w jasny sposób wprowadza czytelnika w słownik pojęciowy i badaną problematykę, a także definiuje węzłowe problemy.

W trzecim rozdziale o hybrydowych systemach rekomendacyjnych, Doktorant precyzyjnie charakteryzuje architekturę tej klasy systemu oraz dane o filmach z bazy danych OMBD. Rozważania zilustrowano adekwatnymi przykładami, przedstawiając rejestr kwantowy składający się z czterech podrejestrów. Omówiono również strukturę kwantowej bazy danych z wyszukiwarką Grovera, a także proces rekomendacji z wykorzystaniem kwantowej wersji klasyfikatora kNN. Przedstawione wyniki obszernych symulacji w chmurze IBM Quantum.

Rozdział czwarty odnosi się do hybrydowych mechanizmów profilowania użytkowników w oparciu o wybrane cechy, co umożliwia rekomendacje właściwych produktów lub usług. Scharakteryzowano również drzewa profilujące oraz lasy drzew profilujących. Omówiono ograniczenia proponowanych podejść i przedstawiono porównanie efektywności obliczeń na komputerze IBM Melbourne oraz na symulatorze IBM QASM. Doktorant umiejętnie wskazuje kierunek, w którym potoczą się rozważania w dalszej części rozprawy.

Rozdział piąty o pomiarze ilości splątania w procesie rekomendacji zawiera zwięzły opis pakietu *EntDetector* do wykrywania i analizy splątania stanów kubitów. W rozdziale zaproponowano procedurę wyznaczania współczynnika *Negativity* dla jednej oraz dwóch cech, co umożliwi określenie poziomu zgodności rekomendacji dla wybranych cech.

W podsumowującym rozdziale szóstym Doktorant słusznie wskazał na zalety zastosowania zaproponowanego podejścia. Końcowe wnioski dotyczą najważniejszych osiągnięć Autora. Omówiono również kierunki dalszych badań. Na wysoką ocenę zasługuje również obszerny dodatek do pracy. Oczywiście, obszar zastosowań proponowanego podejścia w rozprawie może być znacznie szerszy.

Podjęwając się napisania rozprawy, Doktorant nie mógł być pewien, że osiągnie postawiony cel naukowy. Istotne jest to, że udało mu się to zrobić. Podczas weryfikacji hipotezy naukowej Autor umiejętnie skorzystał z dorobku teorii naukowych dotyczących informatyki kwantowej, uczenia maszynowego oraz modelowania matematycznego.

Rozdziały w rozprawie są klarowne i napisane poprawnym językiem. Widać, że Autor nie będzie miał problemów związanych z pisaniem publikacji naukowych. Doktorant poprawnie używa konstrukcji językowych pod względem gramatycznym, semantycznym i pragmatycznym. Układ pracy jest adekwatny, struktura podziału treści – prawidłowa. Zakres jest spójny i przejrzysty.

Wykaz literatury zawiera reprezentatywne pozycje. Przeprowadzono analizę literatury przedmiotu, a zgromadzony materiał dobrze świadczy o wiedzy Autora. Przegląd wyników związanych z dziedziną jest poprawny, zaś wyciągnięte wnioski nie budzą zastrzeżeń. Sposób cytowania oraz podawania źródeł jest właściwy.

W badaniach Doktorant wykazał wycucie w zakresie doboru metod oraz procedur postępowania. Autor wywiązał się z postawionego zadania, wynikającego z określonego celu naukowego. Na podstawie lektury doktoratu uznać można, że mgr inż. Marek Wróblewski wykazał się odpowiednią wiedzą w zakresie informatyki kwantowej, sztucznej inteligencji i systemów rekomendacji, jak również umiejętnością przyjęcia racjonalnych założeń oraz stosownym warsztatem naukowym i inżynierskim.

W syntetycznym ujęciu należy stwierdzić, że do kluczowych osiągnięć Doktoranta zaliczyć można następujące elementy:

1. Zaproponowanie spójnego modelu opisu zjawisk kwantowych, adekwatnego do przeprowadzenia rozważań o kwantowo inspirowanych systemach rekomendacji;
2. Opracowanie hybrydowego systemu rekomendacji oraz przeprowadzenie wielowariantowych symulacji obliczeniowych;
3. Wykorzystanie klasyfikatora kNN do kwantowego uczenia maszynowego;
4. Przeprowadzenie analizy poziomego splątania kubitów w rejestrze kwantowym;
5. Zaprojektowanie obwodu kwantowego w środowisku IBM Quantum;
6. Porównanie wybranych wersji kwantowych systemów rekomendacji;
7. Obszerny przegląd literatury przedmiotu.

Uwzględniając wymienione oryginalne osiągnięcia naukowo-badawcze, uważam, że mgr inż. Marek Wróblewski wykazał się umiejętnością samodzielnego rozwiązywania zagadnień naukowych i projektowych w wymaganym zakresie.

Na podstawie lektury całości rozprawy, należy także uznać, iż Autor w wystarczającym stopniu posiadał umiejętności: analizy problemu naukowego, prezentacji wnoszonych innowacji oraz interpretacji uzyskanych wyników. Docenić należy również fakt, że Doktorant włożył bardzo duży wysiłek w przygotowanie rozprawy.

### **3. Dyskusyjne elementy dysertacji**

Bardzo trudno doszukać się w rozprawie nieco słabszych fragmentów. Wymieniłbym może trzy elementy dysertacji, o których warto podyskutować na publicznej obronie. Najważniejszym z nich jest pełniejsze uzasadnienie zalet opracowanego hybrydowego

systemu rekomendacji. W jakim stopniu pod względem jakości rekomendacji, zajętości pamięci oraz czasu wyznaczania rekomendacji wspomniany system poprawia standardowe rozwiązania? To samo pytanie nasuwa się w odniesieniu do procedury profilowania. Jakie są ograniczenia w powyższym zakresie dla współczesnych procesorów kwantowych oraz symulatorów?

Autor skonstruował kwantowo inspirowane: bazę danych, procedurę rekomendacji oraz mechanizm profilowania. Który z tych modułów oddziałuje w największym stopniu na system rekomendacji? Jak wpłynie na jakość uzyskiwanych wyników zmiana bazy danych z wersji kwantowej na standardową?

W rozprawie brakuje szerszego odniesienia do poprawienia wady klasyfikatora kNN związanej z koniecznością doboru liczby sąsiadów. W tym kontekście można się również zastanowić nad możliwością wykorzystania innych klasyfikatorów, np. sztucznych sieci neuronowych.

Warto podkreślić, że rozprawa napisana jest niezwykle starannie w języku polskim. Nie występują w niej istotne błędy stylistyczne. Również system oznaczeń, założeń i definicji nie zawiera zauważonych nieprecyzyjności.

#### **4. Przydatność rozprawy dla nauk inżynierijno-technicznych**

Główny wynik recenzowanej rozprawy doktorskiej to kwantowo inspirowane podejście do projektowania systemu rekomendacji, w tym profilowania użytkowników. Przyjęta metodyka konstruowania tej klasy algorytmów oraz ich analizy jest w pełni zasadna. Problematyka ta jest niezwykle ważna w systemach webowych, uczeniu maszynowym i aplikacjach e-commerce, ale ze względu na wysoki stopień trudności uwzględniana jest w literaturze przedmiotu w niewielkim jeszcze stopniu. W związku z tym poszerzenie wiedzy i doświadczenia w tym obszarze oraz rozwijanie nowych narzędzi programistycznych słusznie jest przedmiotem dociekań naukowych i realizacji projektów badawczych.

Przydatność rozprawy dla dziedziny nauk inżynierijno-technicznych jest zatem ewidentna ze względów poznawczych i aplikacyjnych. Podnoszone przeze mnie uwagi krytyczne nie wpływają na bardzo wysoką ocenę oryginalnych osiągnięć naukowo-badawczych i zasadniczych wyników zawartych w recenzowanej pracy. Dysertacja stanowi ważny krok w rozwoju informatyki technicznej i telekomunikacji, w tym kwantowo inspirowanych algorytmów.

## 5. Podsumowanie

Podsumowując, stwierdzam, że praca pt.: „*Kwantowe metody obliczeniowe w hybrydowych klasyczno-kwantowych systemach rekomendacyjnych*”, której autorem jest *mgr inż. Marek Wróblewski* w przedstawionej formie spełnia wymagania przewidziane dla rozpraw doktorskich w aktualnie obowiązującej ustawie. Dlatego, stawiam wniosek o przyjęcie jej jako rozprawy doktorskiej i o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

Ponadto, ze względu na nowatorskie podjęcie tematyki związanej z kwantowym uczeniem maszynowym oraz systemami rekomendacji, nagradzając innowacyjność dysertacji, pragnę zgłosić wniosek o wyróżnienie ww. rozprawy. Uważam, że otrzymane rezultaty, wysoki poziom trudności rozwiązywanego problemu badawczego i znakomity sposób napisania rozprawy w pełni to uzasadniają.

