

dr hab. inż. Marek Sawerwain, prof. UZ
Instytut Sterowania i Systemów Informatycznych
Wydział Informatyki, Elektrotechniki i Automatyki
Uniwersytet Zielonogórski
ul. Licealna 9
65-417 Zielona Góra
tel.: 68 328 2321
e-mail: M.Sawerwain@issi.uz.zgora.pl

Zielona Góra, 29.05.2026r.

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgra Tomasza Śmierzchalskiego
*Sieci neuronowe i tensorowe w badaniu
kwantowych procesorów wyzarzających*

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pt. „Sieci neuronowe i tensorowe w badaniu kwantowych procesorów wyzarzających” przygotowana przez Pana mgra Tomasza Śmierzchalskiego pod kierunkiem dr hab. Bartłomieja Gardasa (promotor) oraz dr hab. inż. Łukasza Paweli (promotor pomocniczy).

1 Ogólna charakterystyka pracy i jej tematyka

W informatyce kwantowej, w obszarze sprzętu obecnie notuje się implementacje kilkunastu różnych technologii maszyn obliczeniowych takich jak np. próbkowanie bozonowe, qubity zrealizowane za pomocą technologii atomów neutralnych, układów nadprzewodzących, pułapek jonowych, a także systemów tzw. wyzarzania kwantowego (WK), gdzie sprzętowo dokonano realizacji obliczeń adiabacyjnych. Każde z proponowanych rozwiązań różni się pod kątem oferowanego modelu obliczeń, jednakże w obszarze wyzarzania kwantowego, postępuje stały rozwój technologii i recenzowana praca przedstawia analizę możliwości tego typu rozwiązań technologicznych, co stanowi bardzo interesujące podsumowanie i ocenę jakości oraz otrzymywanych rezultatów z obecnie dostępnych systemów wyzarzania kwantowego.

Autor pracy określił następujące zagadnienia jako główne tezy swojej pracy:

- (T1) Oprogramowanie Spin-GlassPEPS.jl uwzględniające topologię sieci tensorowej oraz heurystykę do optymalizacji i próbkowania na grafach quasi-dwuwymiarowych zgodnych z łącznością poszczególnych QPU (ang. quantum processing unit).
- (T2) Podanie metodologii testów i bezpośrednia ocena wyzarzania kwantowego w porównaniu z metodami klasycznymi, inspirowanymi kwantowo, i sieciami tensorowymi przy użyciu porównywalnych metryk w odpowiednich rodzinach instancji.

- (T3) Termodynamiczna charakterystyka wyżarzaczy kwantowych jako efektywnych maszyn cieplnych, łącząca wydajność obliczeniową z wydatkami fizycznymi i umożliwiającą ocenę harmonogramu za pomocą miar wydajności.
- (T4) Podejście do przetwarzania końcowego wykorzystujące uczenie wzmacniające w celu ulepszenia zwracanych próbek i ograniczenia efektywnych błędów bez zmian wyżarzania.
- (T5) Dokładna symulacja jednostkowa małych przypadków wyżarzania sytemu D-Wave, służąca do sprawdzenia ilościowej zgodności pomiędzy symulowanymi i obserwowanymi eksperymentalnie rozkładami wyjściowymi.

Dodatkowo też Autor wskazuje, że ważnym celem pracy było:

- (TD1) stworzenie całościowej metodologii (tzw. frameworku) do analizy porównawczej technologii wyżarzania kwantowego, w którym deklaracje dotyczące wydajności są poparte solidnymi klasycznymi danymi bazowymi i uzupełnione o wyraźne rozliczenie kosztów fizycznych.

Wobec podanych tez, rozprawa porusza fundamentalny aspekt pracy aktualnie dostępnych systemów WK. Dotyczy bowiem oceny ich możliwości w sposób całościowy, biorąc pod uwagę kilkanaście różnych własności tj. właściwości próbkowania, dostępnych konfiguracji, koszt fizyczny realizowania obliczeń, w tym także bardzo mocno podkreślana przez Autora rozprawy efektywność termodynamiczna. Autor w rozprawie proponuje szereg rozwiązań do zrealizowania takiej oceny i pokazuje je zastosować na aktualnie dostępnych (w trakcie prac nad publikacjami i rozprawą) sprzętowych rozwiązaniach wyżarzaczy kwantowych.

Pierwszy rezultat to pakiet `SpinGlassPEPS.jl` opracowany na sieciach tensorowych oraz przeszukiwanie typu branch-and-bound w przestrzeni wartości prawdopodobieństwa, co umożliwia kontrolę dokładności obliczeń poprzez parametry takie jak m.in odwrotna temperatura czy wymiar wiązania. W ten sposób Autor uzyskuje dane z symulacji numerycznej, które może porównać do danych otrzymywanych z urządzenia fizycznego.

Drugi temat podjęty przez Autora, to wymieniona już analiza WK z perspektywy termodynamicznej. Autor traktuje urządzenia jako maszyny cieplna, gdzie wydajność obliczeniowa jest powiązana z dysypacją energii, entropia i temperaturą w trakcie przetwarzania harmonogramu procesu wyżarzania. Ważnym rezultatem w tym kontekście jest wykazanie, że wprowadzenie przerw/pauz w procesie wyżarzania mogą poprawić jakość rozwiązań oraz pomniejszyć koszt termodynamiczny całego procesu. Autor pokazał również iż wskazać można obecność pola podłużnego pogarszającego wyniki końcowe, i co ważne wskazano dla jakich parametrów ten efekt może następować.

W rozprawie Autor także pokazał jak wykorzystać metodę postprocessingu opartą na procesie uczenia ze wzmocnieniem, aby poprzez wykonywanie operacji lokalnych w efekcie końcowym ma pozwolić na uzyskanie takiej konfiguracji niższej energii aby poprawić jakość wyników końcowych, przy założeniu że sam proces wyżarzania nie jest modyfikowany.

Rezultatem podsumowującym są symulacji dynamiki adiabaticznej małych układów kwantowych. W ten sposób można lepiej zapoznać się z samym procesem WK i pozwala to na bezpośrednie porównanie modelu teoretycznego z danymi uzyskanymi z eksperymentu. Uzyskane przez Autora wyniki, pozwalają na stwierdzenie iż odtworzenie obserwowanych statystyk wyjściowych może wymagać przyjęcia założenia obecności szumu, co naturalnie przekłada się na dodatkowe źródła błędów bądź silniejsze i co oczywiste niepożądane sprzężenie układu ze środowiskiem.

Podsumowując całość, Autor opracował kilka pojęć, czy też narzędzi (które w całości można za j. angielskim określić słowem *framework*), które pozwalają na spójne porównanie wyżarzaczy kwantowych i wiarygodną ocenę ich możliwości.

2 Zawartość rozprawy

Całość rozprawy to 158 stron, gdzie pierwsze 18 stron to strona tytułowa, spis treści, spis publikacji, streszczenie, rozdział wprowadzający. Następnie 140 stron to pozostałe rozdziały i dodatki stanowiące główny trzon rozprawy.

W rozdziałach pierwszym i drugim Autor przedstawia podstawowe informacje o tzw. klasycznym modelu Isinga oraz jego wersji wyrażonej jako problem QUBO. Podano tam także algorytmy związane z wyżarzaniem Isinga oraz symulowanej bifurkacji dla modelu Isinga. Rozdział drugi także przedstawia informacje wprowadzające, ale tym razem dotyczy to kwantowego modelu adiabaticznego i kwantowego wyżarzania. Rolę uzupełniającą pełnią także dodatki A, B, C, D, gdzie Autor zawarł informacje o stosowanej notacji w modelu obliczeń kwantowych – Dodatek A, wprowadzenie do sieci tensorowych przedstawiono w Dodatku B. Dodatek C omawia zagadnienia głębokiego uczenia ze wzmocnieniem, natomiast ostatni Dodatek D przedstawia wybrane parametry fizyczne systemu D-Wave.

Rozdziały, trzeci, czwarty, piąty, szósty, siódmy odnoszą się do bezpośredni do tez (T1)-(T5) postawionych na początku pracy. W szczególności teza (T1) jest opisana w Rozdziale 3, teza (T2) jest omawiana w rozdziale czwartym. Rozdział 5 przedstawia Termodynamiczną charakterystyką wyżarzaczy kwantowych co odnosi się do tezy (T3). Wyniki odnoszące się do tezy (T4) zawarto w rozdziale szóstym. A rozdziały siódmy wzorem poprzednich odnosi się bezpośrednio do tezy (T5). Podsumowanie i bibliografia dopełniają całość pracy.

Ogólnie, przyjęty podział na wstęp, rozdziały wprowadzające, rozdziały właściwe tematyce rozprawy i dodatki uzupełniające w pełni pozwolił Autorowi na prezentację osiągniętych wyników i ogólnie struktura pracy jest prawidłowa i należy ją ocenić jako bardzo dobrą.

3 Najważniejsze osiągnięcia zaprezentowane w rozprawie

Główne rezultaty osiągnięte przez Autora rozprawy przedstawiono w rozdziałach od trzeciego do siódmego. Odnoszą się one kolejno do tez (T1)-(T5) przedstawionych na początku rozprawy.

3.1 Pakiet Spin-GlassPEPS.jl

W tym rozdziale przedstawiono pakiet `SpinGlassPEPS.jl` (praca P1) implementujących heurystykę opartą na TN, wprowadzoną w pracy (P2). Metoda ta pozwana na próbkowanie i wyszukiwanie niskoenergetyczne modeli typu Isinga na grafach jakie zaimplementowano we współczesnych annealerów kwantowych (np. quasi-2D-podobnych w procesorach WK typu Pegasus i Zephyr). Wykorzystuje ona redukcję uwzględniającą topologię do lokalnych klastrów Potts'a, reprezentację wynikowej funkcji partycji w stanie par splątanych (tzw. PEPS) oraz wyszukiwanie rozgałęzień i ograniczeń w przestrzeni konfiguracyjnej.

W praktyce jakość i czas wykonania rozwiązania są kontrolowane przez zestaw parametrów (w szczególności temperaturę odwrotną β , maksymalny wymiar wiązania χ , prawdopodobieństwo odcięcia (opisany na stronach 29–30 rozdziału trzeciego rozprawy) oraz liczbę zachowanych gałęzi M), co sprawia, że podejście to dobrze nadaje się do badań porównawczych, w których kompromis między dokładnością a kosztami musi być wyraźny. Algorytm i oprogramowanie zostały opracowane równolegle i są ściśle powiązane tzn. wybory implementacyjne (struktury danych, zaplecza kontrakcyjne, wykorzystanie GPU) bezpośrednio kształtują dostępne parametry, co w konsekwencji przekłada się na wydajność solvera, którą Autor sprawdzał doświadczalnie. Głównym wkładem jak podał Autora jest tu rozwój oprogramowania i wysiłek inżynierski, który jest zatem głównym punktem ciężkości tego rozdziału.

Rozdział zatem przedstawia realizację algorytmu oraz omówienie techniki implementacji podejścia Potts, rozwiązywanie modelu Isinga. Przedstawiony opis naturalnie przedstawia najważniejsze aspekty opracowanego rozwiązania i Autor w tym rozdziale odpowiada na zadania postawione w tezie (T1).

3.2 Kwantowe wyźarzaczce kontra podejście klasyczne

Rozdział nawiązuje do głównych tez pracy czyli opracowanie procedury testowej do sprawdzania WK. Autor opracował oraz wdrożył tzw. framework do przeprowadzania testów dla wyźarzaczy kwantowych, wraz z porównaniem do klasycznych rozwiązań bazowych. Test są przeprowadzane na określonej rodzinie instancji oraz opracowane narzędzie pozwala na systematyczne gromadzenie oraz interpretację wyników eksperymentalnych w ramach opracowanego przez Autora protokołu, gdzie ważną własnością jest jego unifikacja.

Opis metodologii podano w rozdziale 4.1, Autor zaproponował metryki do porównania rozwiązania kwantowego z klasycznym. Pierwsza metryka, E_{approx} , jest definiowana jako względna różnica między rozwiązaniem znalezionym daną metodą a najlepszym rozwiązaniem znalezionym wszystkimi metodami. Drugą proponowaną metryką jest metryka różnorodności rozwiązań służąca jako sposób badania jakości pobierania próbek różnych przybliżonych rozwiązań problemu "spin-szko" oznaczona jako D_{approx} .

Wyniki dotyczące porównania za pomocą opracowanych metryk opisano w rozdziale 4.2.

3.3 Własności termodynamiki kwantowych wyźarzaczy

W rozdziale 5 Autor analizuje WK traktując je jako maszyny termodynamiczne. Zamiast stosowania testów porównawczych z metrykami obliczeniowymi stosowane są własności fizyczne. Wykorzystano relacje fluktuacji oraz termodynamiczne relacje niepewności. Autor wyodrębnił certyfikowane sprzętowo ograniczenia odnoszące się do pracy, ciepła, produkcji entropii oraz mocy bezpośrednio ze statystyk energetycznych uzyskanych eksperymentalnie. Tak zaproponowane ramy umożliwiają testowanie wyźarzaczy kwantowych z uwzględnieniem energii oraz zapewniają perspektywę ich wydajności, niezależną od czasu do rozwiązania i co bardzo ważne są niezależne od jakości rozwiązania.

Autor zaproponował eksperymentalny protokół obejmujący odpowiedni dobór harmonogramów i parametrów sterowania. Co bardzo ważne prace te były wykonywane na rzeczywistym

sprzęcie z procesorem wyżarzania kwantowego D-Wave. Przeprowadzono analizę oraz interpretację wyników poprzez przetwarzanie otrzymanych wyników eksperymentu, wyodrębnianie odpowiednich wskaźników wydajności oraz ilościowe określanie powiązanych implikacji energetycznych/termodynamicznych.

Model WK jako maszyny termodynamicznej przedstawiono w rozdziale 5.1 a dokładny opis metodologii w 5.2 wraz z uwzględnieniem przestoju/pauzy w procesie wyżarzania. Podobnie jak poprzednie rezultaty omówione w rozdziale 5.3.

Wykorzystując twierdzenie o fluktuacji i termodynamiczne zależności nieoznaczoności, Autorowi udało się pokazać, że dyssypacja i aktywność energetyczna są wyraźnie zlokalizowane w oknie w połowie procesu wyżarzania, gdzie Hamiltonian sterowania i opisu oraz problemu konkurują ze sobą najsilniej. Zarówno w przypadku jedno-, jak i dwuwymiarowym, to wskazane okno charakteryzuje się zwiększonymi fluktuacjami energii, podwyższonymi efektywnymi temperaturami oraz pikami w certyfikowanych granicach pracy oraz mocy.

Obserwacje te są zgodne z teorią równowagi i wcześniejszymi badaniami krytycznej oraz prawie krytycznej dynamiki wyżarzania. Z obliczeniowego punktu widzenia analiza termodynamiczna wyjaśnia rolę projektowania harmonogramu. Przerwy w połowie wyżarzania jak pokazał Autor, mogą znacząco zwiększyć prawdopodobieństwo sukcesu w stanie podstawowym poprzez umożliwienie relaksacji termicznej, ale ten efekt zależy w dużej mierze od struktury krajobrazu energetycznego. W szczególności, gdy krajobraz jest już silnie obciążony polem zewnętrznym, zatrzymanie się może przynieść efekt przeciwny do zamierzonego tzn. pogorszyć jakość wyniku końcowego. To pokazuje, że wzrost prawdopodobieństwa sukcesu często odzwierciedla kompromis między termalizacją a rozproszeniem.

3.4 Zarządzanie błędami z pomocą uczenia ze wzmocnieniem

W tym rozdziale Autor opracował i zaprojektował schemat łagodzenia błędów opartego na uczeniu przez wzmacnianie. Zaimplementowano także model obliczeniowy i procedurę treningową. Autor przeprowadził eksperymenty numeryczne na danych wyżarzania kwantowego oraz przeprowadził analizę i interpretację wyników co zostały zaprezentowane w rozdziale 6.3.

W procesie uczenia zastosowano standardową formułę uczenia się przez wzmacnianie opartą na procesie decyzyjnym markowa, w którym zadany agent wchodzi w interakcję z otoczeniem w dyskretnych krokach czasowych $t = 0, 1, \dots, T$. W każdym kroku agent obserwuje stan s_t i wybiera akcję a_t ze zestawu działań A zgodnie ze swoją polityką π . Następnie środowisko zwraca nagrodę skalarną, r_t , i przechodzi agenta do następnego stanu, s_{t+1} . Natomiast architektura modelu jest inspirowana modelem DIRAC (Deep reinforcement learning for spIn-glass gRound-stAte Calculation). Autor pokazał także podstawowe informacje o procedurze uczenia, wskazując na postać trajektorii stanów, akcji i przejść/tranzycji.

Wyniki z procesu uczenia zaprezentowano w rozdziale 6.3 jest to głównie ilustracja 6.2 gdzie pokazano poprawę prawdopodobieństwa.

Autor także pokazał, czy uczenie przez wzmacnianie jest konieczne, stosując heurystykę zachłannego pokonywania wzniesień metodą pojedynczego obrotu. Testy te wskazują, że zachłanne zejście często zostaje uwięzione w pobliskich lokalnych minimach i działa gorzej niż podstawowy proces wyżarzania lub proces wyżarzania wsparty uczeniem ze wzmocnieniem. Agent uczenia przez wzmacnianie czasami akceptuje lokalnie niekorzystne ruchy, które umożliwiają ucieczkę z takich

minimów, co sugeruje, że przechwytuje nietrywialne informacje strukturalne o typowych wzorcach błędów lub lokalnych cechach krajobrazu indukowanych przez sprzętowe osadzanie. Mimo tych problemów wyniki wskazują, że uczenie przez wzmacnianie zapewnia niewielką, acz spójną przewagę w zakresie odporności w post-processingu wyników wyżarzania kwantowego, bez znaczącego wzrostu głębokości poprawy energii.

3.5 Symulacje małych systemów w modelu adiabatycznym

W rozdziale 7 Autor prezentuje wyniki związane z tezą (T5). Autor bowiem zaimplementował i uruchomił dokładne symulacje dynamiki wyżarzania w systemie zamkniętym, rozszerzył symulator o model efektywnego błędu sterowania (zaburzenia sprzężenia) i przeprowadził odpowiednie eksperymenty z procesorami QPU. Następnie przeprowadzono kompleksowe przetwarzanie danych i przeprowadzono porównanie między symulacją a sprzętem, określając ilościowo, jak efektywny jest model błędu.

Całość symulowanej dynamiki kwantowej została opisana w rozdziale 7.1, a proces zbierania danych zaprezentowano w rozdziale 7.2. Pokazano także dwie metryki TVD oraz F , które posłużyły do porównania otrzymanych wyników. Rezultaty tj. medianę prawdopodobieństwa stanu podstawowego zaprezentowana na ilustracji 7.3, dla wyznaczonego zbioru danych tj. 4000 próbek. Wcześniej pokazano również medianę dwóch wcześniej wprowadzonych w tym rozdziale metryk.

3.6 Reprodukacja rezultatów

Ważnym elementem w pracy jest także dostarczenie kodów źródłowych proponowanego rozwiązania `Spin-GlassPEPS.jl` oraz dostępu do repozytorium, gdzie znajduje się kod pakietu dla środowiska Julia. Takie rozwiązanie, umożliwia łatwą weryfikację proponowanych rozwiązań a także na pełną reprodukcję wyników. Autor dostarczył także dokumentację techniczną pakietu. Przekłada się to na wysoką ocenę pracy Autora oraz pozwala podkreślić rzetelność przeprowadzonych eksperymentów numerycznych.

3.7 Uwagi krytyczne oraz pytania

Praca, co naturalnie dość obszernie przedstawia uzasadnienie przyjętych tez, jednakże można nakreślić kilka pytań i dodatkowych problemów do Autora pracy, a przedstawiałyby się one następująco:

- (P1) W rozdziale trzecim Autor wskazuje iż będzie przedstawiał tylko wybrane aspekty i własności opracowanego algorytmu, jednakże pytanie o wydajność jest tu bardzo zasadne szczególnie w kontekście zastosowania GPU. W rozprawie, niestety nie ma choćby krótkiej analizy złożoności obliczeniowej Algorytmu 1, Algorytmu 2, Algorytmu 3, szczególnie ich podatności na techniki programowania równoległego.
- (P2) Również Algorytm 4 pozostał bez analizy złożoności obliczeniowej, w pracy też niestety nie ma odniesienia do tego algorytmu, podobnie jak do pozostałych algorytmów.

- (P3) Autor nie podał też analizy poprawności metryk wprowadzonych w rozdziale 4. Chciałbym się zapytać jakie własności typowe dla metryk są spełnione dla proponowanych metryk?
- (P4) Czy wartość Q_{GS} wzór 5.17 jest od góry ograniczona przez np. możliwości sprzętowe, czy też jest wyskalowana do jedności co oznaczałoby najlepszą jakość?
- (P5) W rozdziale 6.2 Autor opisuje model i schemat trenowania, pytanie jakie tu można nasunąć o charakterze wydajnościowym, to czas trenowania modelu i jakie zasoby są potrzebne aby przeprowadzić skutecznie procedurę treningu?

3.8 Pytania bezpośrednie do rozprawy

W tej części recenzji znajdują się odpowiedzi na ankietowe pytania krótko charakteryzujące całość recenzowanej rozprawy.

- (PO1) Czy tematyka rozprawy jest aktualna i jak jest związana z rozwojem dyscypliny?
Tak, informatyka kwantowa to nowoczesny dział informatyki którego dynamiczny rozwój można obserwować w ciągu ostatnich dwudziestu, trzydziestu lat. A rozwój algorytmów optymalizacyjnych do których przynależą wyżarzacz kwantowe to naturalnie bardzo ważny dział metod optymalizacyjnych, a praca dostarcza nietrywialnych narzędzi do oceny pracy takiego systemu.
- (PO2) Jaki jest problem naukowy podejmowany przez Autora i czy został on trafnie sformułowany?
Problem naukowy został sformułowany przez Autora pracy we wstępnych fragmentach pracy, i został opisany przez zestaw tez (T1)-(T5) i uzupełniony tezą TD5. Postawione zadania są jednoznacznie i czytelnie sformułowane.
- (PO3) Czy Autor rozwiązał postawiony problem i czy wykorzystał w tym celu właściwe metody?
Tak, praca, publikacje pozwoliły Autorowi na wykazanie iż opracowane przez niego narzędzia mogą z powodzeniem być zastosowane do oceny jakości wyżarzania kwantowego, a przedstawione metody teoretyczne i realizacja eksperymentów numerycznych i na fizycznych układach wyżarzaczy potwierdzają poprawność stosowanych metod.
- (PO4) Na czym polega oryginalny wkład Autora w dyscyplinę?
Opracowane metody dotyczące oceny metod optymalizacji oparte o wyżarzania kwantowe naturalnie są nowymi narzędziami do oceny jakości pracy, a zastosowanie uczenia przez wzmocnianie, pozwalają też na polepszenie otrzymanych rezultatów.
- (PO5) Jakie jest znaczenie poznawcze oraz znaczenie praktyczne wkładu Autora?
Autor oprócz opracowania rozwiązania do testów WK, opracował oprogramowania do heurystycznego znajdowania konfiguracji nisko-energetycznych uogólnionych modeli Potts'a, w tym Isinga i QUBO ma także duże znaczenie dla zainteresowanych tym obszarem Bada-czy, i pozwala na uzyskanie danych z symulacji do porównania z wynikami otrzymanymi ze sprzętu, co oczywiście pozwala na porównanie jakości sprzętowych rozwiązań do teoretycz-nych symulacji.

(PO6) Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy Autora w zakresie nauk technicznych i szczególnej wiedzy odpowiadającej zakresowi badań?

Tak, Autor zrealizował wiele eksperymentów w praktyce potwierdzających jakość otrzymanych rezultatów, i ogólnie dostarczył metod do badania jakości rozwiązań sprzętowych i symulacji programowanych dla systemów wyżarzania kwantowego. Odnosi się to bezpośrednio do dziedziny informatyka techniczna i telekomunikacja, gdzie ogólnie rozumiane metody optymalizacyjne są szeroko stosowane.

(PO7) Jakie są słabe strony rozprawy?

- W pracy występują pomniejsze niedociągnięcia typograficzne (np. tzw. wiszące wdowy), jednakże naturalnie nie mają one znaczenia merytorycznego dla całości pracy. Brakuje także typowego sformułowania tezy pracy, jednakże podane na stronie XII główne zagadnienia pracy plus cel główny, można potraktować jako tezę główną pracy, zatem ostatecznie Autor w sposób nie budzący wątpliwości wskazuje główne zadania realizowanej pracy.
- W pracy pominięto też dyskusję nad wydajnością, złożonością obliczeniową proponowanych algorytmów np. 1,2,3 czy 4 z rozdziału trzeciego, jednakże nie umniejsza to osiągnięć pracy, a stanowi interesujący problem do zrealizowania w przyszłych pracach o czym zresztą Autor w podsumowaniu wspomniał.

4 Podsumowanie oraz konkluzja końcowa

Dorobek publikacyjny Autora rozprawy, wskazany na początku rozprawy liczy razem pięć pozycji, Prace bezpośrednio odnoszące się do tematyki podejmowanej w rozprawie wprost podane przez Autora dysertacji to:

- (P1) T. Śmierzchalski, A. M. Dziubyna, K. Jałowiecki, Z. Mzaouali, Ł. Paweła, B. Gardas, and M. M. Rams, "SpinGlassPEPS.jl: Tensor-network package for Ising-like optimization on quasi-two-dimensional graphs", *SoftwareX* 31, 102257 (2025).
- (P2) A. M. Dziubyna, T. Śmierzchalski, B. Gardas, M. M. Rams, and M. Mohseni, "Limitations of tensor-network approaches for optimization and sampling: A comparison to quantum and classical Ising machines", *Phys. Rev. Appl.* 23, 054049 (2025).
- (P3) T. Śmierzchalski, Z. Mzaouali, S. Deffner, and B. Gardas, "Efficiency optimization in quantum computing: balancing thermodynamics and computational performance", *Sci. Rep.* 14, 4555 (2024).
- (P4) T. Śmierzchalski, Ł. Paweła, Z. Puchała, T. Trzciniński, and B. Gardas, "Post-error Correction for Quantum Annealing Processor Using Reinforcement Learning", in *Computational Science – ICCS 2022*, edited by D. Groen, C. de Mulatier, M. Paszynski, V. V. Krzh

Prace (P1), (P3) przynależą do najwyższej punktowanych czasopism o wartości 200pkt, natomiast prace [P2], [P4] to 140 pkt co poświadcza wysoką jakość otrzymanych wyników przez Autora.

Autor rozprawy wskazuje także piątą pracę (za 140pkt) jak uzupełniającą jego dorobek publikacyjny:

- (P5) T. Śmierzchalski, J. Pawłowski, A. Przybysz, Ł. Paweł, Z. Puchała, M. Koniorczyk, B. Gardas, S. Deffner, and K. Domino, "Hybrid quantumclassical computation for automatic guided vehicles scheduling", Sci. Rep. 14, 21809 (2024).

W mojej ocenie wyniki przedstawione w rozprawie w sposób zasadniczy pozwala utworzyć spójny system oceny jakości pracy wyźaraczy kwantowych, zaproponowane rozwiązanie polegające na zastosowaniu uczenia ze wzmocnieniem, do poprawy jakości wyników, czy też określenie obszaru wartości parametrów po których można spodziewać się pogorszenia rezultatów, stanowi o jakości opracowanego narzędzia do weryfikacji WK, i jest istotnym oraz znaczącym wkładem w rozwój dyscypliny naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja.

4.1 Konkluzja końcowa

W konkluzji końcowej, na podstawie przedstawionych wcześniej uwag i komentarzy, należy jednoznacznie stwierdzić iż rozprawa doktorska Pana mgra Tomasza Śmierzchalskiego pt. „Sieci neuronowe i tensorowe w badaniu kwantowych procesorów wyźarzających” (ang. Neural and Tensor Networks in The Study of Quantum Annealing Processor) spełnia wymagania ustawy właściwej dla dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja, zatem wnoszę o jej przyjęcie oraz dopuszczenie do publicznej obrony.

(dr hab inż. Marek Sawerwain, prof. UZ)