

Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Warszawa, 21 listopada 2017 r.

D z i e k a n a t

Uprzejmie informuję, że na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej odbędzie się w dniu 5 grudnia 2017 r. publiczna obrona rozprawy doktorskiej

mgr inż. Jerzego Jegiera

temat: „Synteza odwracalnych układów logicznych oparta na wyrażeniach PPRM”

promotor – dr hab. inż. Paweł Kerntopf, prof. Politechniki Warszawskiej

recenzenci:

prof. dr hab. inż. Andrzej Napieralski z Politechniki Łódzkiej

prof. dr hab. inż. Edward Hrynkiewicz z Politechniki Śląskiej

Obrona odbędzie się w dniu 5 grudnia 2017 r. w sali 116 na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych – Gmach im. Janusza Groszkowskiego, Warszawa, ul. Nowowiejska 15/19; początek godz. 10³⁰.

Po adresem: www.elka.pw.edu.pl/Wydzial/Rada-Wydzialu/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje zapewniony jest na stronie Wydziału dostęp do tekstów streszczenia rozprawy i recenzji, jak również do tekstu rozprawy umieszczonej w Bazie Wiedzy Politechniki Warszawskiej.

Dziekan



prof. dr hab. inż. Krzysztof Zaremba

mgr inż. Jerzy Jegier

Synteza odwracalnych układów logicznych oparta na wyrażeniach PPRM

promotor: dr hab. inż. Paweł Kerntopf

Streszczenie

Podjęcie badań nad układami odwracalnymi motywowane było przede wszystkim możliwością zmniejszania zużycia energii w układach elektronicznych. Obecnie zastosowania układów odwracalnych związane są głównie z potencjalnymi zastosowaniami w innych obszarach: przetwarzania sygnałów, kryptografii i grafiki komputerowej, nanotechnologii oraz obliczeniach kwantowych. Problem znajdowania układów odwracalnych o niskim koszcie kwantowym nie został jeszcze rozwiązany. Optymalne układy mogą być znalezione tylko dla funkcji odwracalnych o trzech i czterech zmiennych. W pracy przedstawiono metodę pozwalającą na redukcję kosztu kwantowego układów odwracalnych średnio o 20% w porównaniu z najlepszymi aktualnie rozwiązaniami. Odbywa się to kosztem użycia dodatkowych linii w układzie. W tej metodzie zastosowano - po raz pierwszy w literaturze na temat redukcji kosztu kwantowego w układach odwracalnych - algorytm rozwiązania problemu maksymalnego ważonego dopasowania w grafie. Dodatkowo, w pracy skonstruowano nowe ciągi funkcji wzorcowych oraz implementujące je układy, a także - znowu po raz pierwszy w literaturze - dowody minimalności tych układów dla dowolnie dużej liczby zmiennych.

**KWESTIONARIUSZ-RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY
WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

Tytuł rozprawy: „Synteza odwracalnych układów logicznych oparta na wyrażeniach PPRM”

Autor: mgr inż. Jerzy Jegier

Promotor: dr hab. inż. Paweł Kerntopf

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

W pracy autor zajął się syntezą układów odwracalnych w opisanych za pomocą rozwinięć Reeda-Mullera pozytywnej polaryzacji (ang. Positive Polarity Reed-Muller expressions – PPRM). Warto zauważyć, że zainteresowanie obliczeniami odwracalnymi, a w konsekwencji właśnie układami odwracalnymi, w ostatnich latach zauważalnie rośnie. Układy takie mogłyby być zastosowane w kryptografii czy szeroko rozumianym przetwarzaniu sygnałów, gdzie oczekuje się by pełna informacja z wejścia układu mogła pojawić się na wyjściu co mogą zapewnić właśnie układy odwracalne.

Autor nie sformułował w pracy tezy tylko dwa cele. Jednak pierwszy cel mający następującą treść: „Celem ... jest wykazanie, że algorytm konstruowania układów odwracalnych oparty na wyrażeniach PPRM umożliwia konstruowanie układów odwracalnych o niskim koszcie kwantowym” ma formę tezy. Sformułowany jest prosto i jasno. Drugim celem autora było opracowanie testowych układów odwracalnych.

Praca ma charakter teoretyczny, gdyż ciągle brak jest sposobów praktycznych realizacji niezbyt rozbudowanych i tanich odwracalnych elementów logicznych (bramek odwracalnych). Rozważania teoretyczne uzupełnia bogaty materiał eksperymentalny, pokazujący w szczególności zmniejszenie tzw. kosztu kwantowego realizacji układu w stosunku do innych metod projektowania.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadczącej o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformulowano w sposób jasny i przekonujący?

Wykaz literatury wykorzystanej do napisania rozprawy składa się z 91 pozycji w zdecydowanej większości z ostatnich siedemnastu lat. Większość z tych pozycji poświęcona jest syntezie układów odwracalnych. Autor dokonał ich szczegółowego przeglądu zauważając, że niewiele jest pozycji dotyczących projektowania układów odwracalnych w oparciu o wyrażenia PPRM. Bazując na własnych doświadczeniach autor doszedł do wniosku, że układy oparte na tych wyrażeniach można projektować podobnymi metodami jakie wykorzystuje się przy projektowaniu w oparciu o wyrażenia ESOP. Spostrzeżenie to okazało się w konsekwencji owocne. Autor analizując różne rozwiązania bramek odwracalnych, metody projektowania układów odwracalnych i możliwe zastosowania układów

odwracalnych wykazał się dobrym rozeznaniem w literaturze przedmiotu oraz i jasnym formułowaniem wniosków.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Autor opracował algorytm projektowania układów logicznych odwracalnych oparty na wyrażeniach PPRM. Wychodząc od listy kostek PPRM funkcji odwracalnej (w pracy funkcja hwb4) autor zaproponował sposób sortowania listy kostek najpierw na podzbiory jednorodnie tzn. takie, dla których każda kostka ma taki sam wektor wyjściowy. W kolejnym kroku następuje takie sortowanie listy kostek by odległości Hamminga pomiędzy dwoma sąsiednimi wektorami wyjściowymi były minimalne (jak w problemie komiwojażera). Dzięki temu autor uzyskuje znaczną redukcję bramek CNOT. Kolejnym elementem tego algorytmu jest poszukiwanie największego podzbioru częściowo jednorodnego (podzbiór kostek PPRM, dla których przynajmniej jedna kolumna w liście wektorów wyjściowych zawiera same jedynki). Podzbiór ten zapisywany jest na osobnej liście i usuwany z listy podstawowej a w pozostałej reszcie kostek poszukiwany jest kolejny podzbiór jednorodny Te pposzukiwania prowadzone są do opróżnienia listy kostek. Efektem tych działań jest dalsze zmniejszenie liczby bramek CNOT. Autor zajmował się także zmniejszaniem kosztu kwantowego układu uzyskując bardzo dobre rezultaty. Na uwagę przede wszystkim zwraca w tych badaniach zastosowanie maksymalnego ważonego dopasowania w grafie do zmniejszania kosztu kwantowego układu odwracalnego. Jest to jedno z ważniejszych innowacyjnych osiągnięć doktoranta.

Doktorant zauważył również, i słusznie, istnienie niewielu odwracalnych funkcji wzorcowych i minimalnych ich implementacji. Starając się poprawić tę sytuację doktorant znalazł kilka takich funkcji, a dla części dowody na to, że ekstrapolowane układy odwracalne o dowolnej liczbie wejść są minimalne. Jest to także istotnym osiągnięciem doktoranta.

Ta krótka analiza pokazuje słuszność wybranego przez doktoranta podejścia i właściwe sformułowanie celów pracy.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Najważniejszym, zdaniem recenzenta, osiągnięciem pracy jest opracowanie nowej efektywnej metody projektowania układów odwracalnych. Szczególnie metoda wykazuje swoją efektywność przy minimalizacji kosztu kwantowego projektowanego układu odwracalnego ale jest także przydatna przy zmniejszaniu liczby odwracalnych bramek w układzie.

Jak już wspomniano w poprzednim punkcie ciekawym i oryginalnym pomysłem doktoranta jest zastosowanie maksymalnego ważonego dopasowania w grafie do minimalizacji kosztu kwantowego układu.

Kolejnym osiągnięciem doktoranta jest znalezienie pewnej liczby odwracalnych funkcji wzorcowych i dowodów minimalności implementacji ekstrapolowanych do dowolnej liczby wejść dla niektórych z nich.

Oczywiście należy też zauważyć eksperymenty symulacyjne wykonane przez doktoranta potwierdzające pozytywne rezultaty recenzowanej rozprawy.

Przedstawione osiągnięcia poszerzają wiedzę na temat układów odwracalnych, także w stosunku do literatury światowej.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Rozprawa napisana jest poprawnie. Rozprawa jest dobrze ilustrowana szeregiem schematów i tabel ułatwiających czytelnikowi percepcję jej treści. Na podkreślenie zasługuje bogaty materiał eksperymentalny. Autor musiał poświęcić wiele czasu i pracy na wykonanie tych eksperymentów i ich opracowanie dla celów prezentacji. Ta część pracy bardzo podnosi jej jakość.

Liczba błędów redakcyjnych jest bardzo mała. Recenzentowi udało się znaleźć na str. 41 w tabeli 4.3 określenie „zbiór częściowo jednorodny” a w definicji 4.2 na tej samej stronie został zdefiniowany „podzbiór częściowo jednorodny”. To samo dotyczy określeń „zbiór jednorodny” i „podzbiór jednorodny” stosowanych zamiennie. Pewnie też byłoby przejrzysiej gdyby doktorant trzymał się tych samych oznaczeń w tabelach np. 2.11 czy 2.12 jakie są na rysunku 2.1. Zdanie ze str. 53 „Pierwsza kolumna tabeli (tabela 4.9(a)) pokazuje *kolumna_{id}*, która jest kolumną samych jedynek” jest niejasne.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Słabych stron pracy jest niewiele. Oprócz wymienionych powyżej drobnostek do słabych stron można by zaliczyć brak przykładów fizycznych realizacji układów odwracalnych.

Drugą sprawą jest zamienne stosowanie przez doktoranta terminów konstruowanie i projektowanie (także synteza). Wg recenzenta przedmiotem konstruowania jest konkretna struktura, dla której dobierane są cechy umożliwiające jej fizyczną realizację tzn. cechy materiałowe (elementy, płytki, podłoża itp.), cechy geometryczne (rozmiary elementów, rozmieszczenie itp.) czy cechy dynamiczne (czasy propagacji, czasy dostępu itp.). Natomiast przedmiotem projektowania jest np. struktura układu elektronicznego, urządzenie, proces czyli coś co jest projektowane ale niekoniecznie fizycznie realizowane. To właśnie z tym drugim przypadkiem mamy do czynienia w pracy.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

W ostatnich kilkunastu latach bardzo wzrosło zainteresowanie obliczeniami i układami odwracalnymi. Wiąże się to z nadziejami na zastosowania takich układów w kryptografii, w układach kwantowych, a także z oszczędnością energii (układ odwracalny teoretycznie nie rozprasza energii). Recenzowana praca doktorska wpisuje się w ten nurt badań dostarczając algorytmy projektowania układów odwracalnych opracowane w oparciu o opis układu w postaci rozwinięć Reeda-Mullera pozytywnej polaryzacji. Podejście to zapewnia znaczne zmniejszenie kosztu kwantowego w porównaniu do algorytmów opracowanych z wykorzystaniem opisu układu w postaci ESOP. Opracowanie nowych odwracalnych funkcji wzorcowych i dowodów minimalności dla dowolnej liczby zmiennych jest kolejnym ważnym elementem poszerzającym wiedzę nt. teorii układów odwracalnych. Można zatem stwierdzić, że praca wnosi ważny wkład w rozwój teorii układów odwracalnych i ich projektowanie.

Czytając pracę można zauważyć pewien entuzjazm doktoranta dotyczący układów odwracalnych. Jest to zrozumiałe i uzasadnione uzyskanymi wynikami badań. Zalecałbym jednak pewną ostrożność. Było już wiele pomysłów w informatyce i elektronice, które stwarzały duże nadzieje a jednak nie zawsze się sprawdziły. Można by tu wymienić nadzieję na komputer kriogeniczny pracujący w warunkach ziemskich, który miał się pojawić w połowie lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku, pamięci bąbelkowe, grafen i inne. Nadzieję na budowę układów odwracalnych stwarzają bramki adiabatyczne lub układy kwantowe ale jak na razie dostępnym układów kwantowych nie ma a czy i jak rozwiną się bramki/układy

adiabaticzne też nie wiadomo. Opracowano wprawdzie pod koniec ubiegłego wieku odwracalny mikroprocesor Pendulum a niedawno procesor D-Wave ale są to konstrukcje eksperymentalne i dość ograniczone.

8. Do której kategorii z następujących recenzent zalicza rozprawę?

e/ wybitnie dobra zasługująca na wyróżnienie.

E. Jfk

Prof. dr hab. inż. Andrzej Napieralski

Łódź, dn. 24.09.2017 r.

tytuł, stopień, imię i nazwisko

data

**Katedra Mikroelektroniki i Technik Informatycznych
Politechnika Łódzka**

miejsce pracy

KWESTIONARIUSZ-RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

Tytuł rozprawy: ***“Synteza odwracalnych układów logicznych oparta na wyrażeniach PPRM”***

Autor rozprawy: **mgr inż. Jerzy Jegier**

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Rozdział pierwszy zawiera opis układów odwracalnych, motywacji rozprawy, zakresu i celu rozprawy oraz układu pracy. Podana jest tu między innymi definicja akronimu użytego w tytule pracy PPRM (Positive Polarity Reed Muller expressions) jako wyrażenia będącego funkcją boolowską, w której nie występują zmienne zanegowane i używającą wyrażenia ESOP (EXOR Sum of Products). Autor szczegółowo wprowadza podstawowe pojęcia z jakich będzie później korzystał.

Rozdział drugi (Podstawowe pojęcia) jest napisany wzorowo jeżeli chodzi o formę matematyczną. Autor stosuje uproszczenie bramek kwantowych, które jest później kontynuowane w dalszej części pracy. Nie ma niestety odniesienia do ich realizacji fizycznej jak na przykład do prac Toffoliego i Fredkina dotyczących fizycznej implementacji bramek CNOT, SWAP. Można by tu przytoczyć pracę: *'Implementation of a Toffoli gate with superconducting circuits'*, A.Fedorov, L.Steffen, M.Baur, M. P. da Silva, A. Wallraff, Nature 2012, Vol.481 i pracę *'Implementations of two-photon four-qubit Toffoli and Fredkin gates assisted by nitrogenvacancy centers'*, Hai-Rui Wei, Pei-Jin Zhu, www.nature.com/scientificreports czy też pracę . Monz, T. Kim, et al. *'Realization of the quantum Toffoli gate with trapped ions'* opublikowaną w Phys. Rev. Lett. 102, już w 2009 roku.

Rozdział trzeci (Przegląd metod syntezy układów odwracalnych) ma dużą wartość dydaktyczną. Autor przedstawia historię rozwoju algorytmów syntezy a następnie omawia i porównuje metody oparte na wyrażeniach ESOP oraz wyrażeniach PPRM. Rozdział czwarty (Nowa metoda syntezy oparta na wyrażeniach PPRM) zawiera wyniki osiągnięte przez Autora. Na podkreślenie zasługuje poszerzenie biblioteki środowiska R.

Rozdział piąty (Wyniki obliczeń dla nowej metody syntezy opartej na wyrażeniach PPRM) podsumowuje wyniki pracy.

Rozdział szósty (Konstruowanie funkcji odwracalnych o dowolnej liczbie zmiennych) jest ciekawy pod względem matematycznym. Autor wprowadza tutaj do literatury nową funkcję h_{bn}^* .

Rozdział siódmy zawiera Dowody minimalności dla wybranych układów odwracalnych i podsumowuje wyniki uzyskane przez Autora dla palindromicznych bramek kwantowych zaprezentowanych np. na Rys.7.3, 7.5 i 7.6 oraz 7.7. Istotna jest w nim duża wartość matematyczna i prezentacja szeregu lematów oraz twierdzeń wyrażających minimalną postać niektórych funkcji odwracalnych.

Rozdział ósmy (Podsumowanie) podsumowuje wyniki osiągnięte przez Autora, ale milczy na temat pasożytniczych efektów tak istotnych przy projektowaniu komputerów kwantowych. Podsumowanie doktoratu jest rzeczowe i zwięzłe.

Rozdziały szósty i siódmy świadczą o szerokiej wiedzy Autora na temat syntezy odwracalnych układów logicznych i matematycznych umiejętnościach Autora.

Rozprawa podejmuje aktualny temat syntezy układów logicznych zawierających wyrażenia PPRM czyli wyrażenia typu **Positive Polarity Reed Mueller expressions**, które są szczególnym przypadkiem wyrażeń ESOP i stanowią postać kanoniczną nie wymagającą minimalizacji. Wyrażenia boolowskie ESOP (**EXOR SUM OF PRODUCTS**) umożliwiają prostą translację poszczególnych wyrażeń na bramki odwracalne. Podstawową zaletą metod opartych na tej reprezentacji jest skalowalność. W pracy Autor podejmuje rozważania na temat układów bramek logicznych zawierających bramkę Fredkina i Toffoliego. Takie bramki mają swoje znaczenie zarówno w realizacji komputera kwantowego jak i klasycznego. Rozprawa ma charakter teoretyczny.

2.Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł /w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle/ świadczą o dostatecznej wiedzy autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Autor odwołuje się w rozprawie do 92 pozycji literaturowych. Zawarta bibliografia obejmuje pozycje od roku 1959, przy czym większość stanowią prace opublikowane po roku 2000, co dowodzi dobrej znajomości aktualnej literatury. W bibliografii cytowana jest znaczna liczba publikacji zamieszczonych w wydawnictwach IEEE.

Autor rzetelnie zaprezentował literaturę związaną z syntezą układów logicznych. Szkoda tylko, że zdawkowo potraktował literaturę związaną z praktyczną implementacją komputera kwantowego i trudności z tym związane.

Wnioski wynikające z przeanalizowanej literatury zostały przedstawione w sposób przejrzysty i przekonujący. Wśród cytowanych prac znajduje się sześć pozycji współautorskich Doktoranta, przy czym we wszystkich tych pracach Autor rozprawy występuje na pierwszym miejscu.

3. Czy autor rozwiązał przedstawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

W rozdziale 7 Autor przeprowadził dowody minimalności dla wybranych układów odwracalnych. Sformułował twierdzenia 7.1-7.7.

W obrębie przyjętych założeń upraszczających przeprowadzone rozumowanie jest poprawne, a otrzymane wyniki są wartościowe, choć głównie od strony matematycznej.

Metoda badań przyjęta przez Doktoranta jest prawidłowa i świadczy o jego dojrzałości naukowej.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Praca zawiera ciekawe i oryginalne wyniki. Bardzo interesujące jest porównanie wyników przedstawionych w literaturze w pracach dotyczących układów ESOP ([Nayeem i Rice, 2011], [Bandyopadhyay, Rahaman i Drechsler, 2014], [Shafaei, Saeedi i Pedram, 2014], [Tran, 2015], [Rahman i Rice, 2016], [Chattopadhyay i Hossain, 2016], [Zakablukov, 2015]) z wynikami uzyskanymi przez Autora przy zastosowaniu metody syntezy i post syntezy (redukcji kosztu kwantowego) PMWM (ang. **PPRM Maximum Weighted Matching**) dla funkcji wzorcowych hwb7, hwb8 i urf2, urf3, urf4, permanent3x3 i permanent4x4 (są to całkowicie określone funkcje odwracalne rozważane w tych pracach). Porównanie to jest przedstawione w tabeli 5.1. Algorytm opracowany przez Autora daje gorsze wyniki, jeśli chodzi o koszt kwantowy, tylko w porównaniu z tymi spośród wyżej wymienionych metod, które zakładają użycie obszerniejszych bibliotek bramek (włączając w to tzw. bramki z mieszanym sterowaniem).

Autor rozprawy prezentuje nowe koncepcje w dziedzinie syntezy układów odwracalnych i są one opisane w rozdziałach 4-7. Najciekawsze wyniki prezentuje rozdział 7 (twierdzenia 7.1-7.7).

Cenne są również wyniki i uwagi Autora prezentowane na stronie 65 i 66.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?

Redakcja pracy doktorskiej jest bardzo staranna. Niektóre stwierdzenia są jednak trochę zbyt optymistyczne. Na stronie 10 Autor pisze: „Potencjalnym przykładem

zastosowań układów odwracalnych są urządzenia mobilne. Oszczędność energii jest sprawą kluczową, m.in. ze względu na niestychanie szybki obecnie rozwój urządzeń mobilnych. Wykorzystywane są one w wielu ważnych dziedzinach, np. w medycynie - w urządzeniach monitorujących stan pacjentów.”

Oczywiście trudno się spodziewać by komputery kwantowe były mobilne, sądząc po niezwykle wysokim koszcie technicznym ich uzyskania i podtrzymania koherentnych stanów kwantowych. Z reguły wymaga się temperatur rzędu 10mk. W pracy pojęcie kosztu kwantowego zostało zaadaptowane z gruntu elektroniki klasycznej na elektronikę kwantową i ogranicza się ono jedynie do liczby bramek kwantowych i nie uwzględnia procesów fizycznych odpowiedzialnych za dekoherencję. Trudno więc uznać takie pojęcie kosztu kwantowego za satysfakcjonujące i w pełni realne technicznie (elektronicznie).

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Praca napisana jest w sposób bliższy matematykom i fizykom niż elektronikom. Od elektronika wymaga się by podejmował zagadnienia implementacji nie tylko od strony czysto teoretycznej ale również praktycznej. W pracy nie ma w ogóle mowy o równaniu Schroedingera, macierzach gęstości, pojęciu „fidelity of quantum states” opisującym bliskość dwóch stanów kwantowych, o funkcji Greena, czy też o zjawiskach dekoherencji stanu kwantowego. Taki opis fundamentalny jest niezwykle istotny o ile rozważa się realistyczną implementację układów wielu bramek kwantowych, która jest podejmowana na przykład przez IBM, firmę D-wave oraz Google.

Podejście firmy IBM zaprezentowane zostało na przykład w artykule: „*Demonstration of a quantum error detection code using a square lattice of four superconducting qubits*”, A.D.Córcoles, Easwar Magesan, J.Srinivasan, Andrew W. Cross, M. Steffen, Jay M. Gambetta, Jerry M. Chow, Nature communications, 2014.

Podejście firmy D-wave realizujące tzw. quantum annealing czyli kwantowe wyżarzanie na złączach Josephsona zaprezentowane zostało w prezentacji: <https://www.dwavesys.com/tags/quantum-annealing> czy też w publikacji krytycznej wyników firmy D-wave <https://arxiv.org/abs/1506.03539> oraz w publikacji optymistycznej względem wyników firmy D-wave <https://arxiv.org/abs/1401.3500>.

Podejście firmy Google wydaje się być dobrze zaprezentowane w prezentacji <https://www.youtube.com/watch?v=HQmFEt6l6Tw>.

Podejście firmy Microsoft zawierające nadprzewodzące topologiczne kubity jest zaprezentowane w następujących źródłach bibliograficznych:

<https://blogs.microsoft.com/next/2016/11/20/microsoft-doubles-quantum-computing-beta/>

[http://www.nbi.ku.dk/english/staff/?pure=en%2Fpersons%2Fcharles-m-marcus\(847588e2-ab7e-4698-911c-103e1e919489\)%2Fpublications.html](http://www.nbi.ku.dk/english/staff/?pure=en%2Fpersons%2Fcharles-m-marcus(847588e2-ab7e-4698-911c-103e1e919489)%2Fpublications.html).

Podejście pułapek jonowych i porównanie tego podejścia do architektury komputera kwantowego z użyciem nadprzewodnika ze złączami Josephsona można znaleźć w pracy: „*Experimental comparison of two quantum computing architectures*”, Norbert M. Linke et al. opublikowanej w 2017 roku w Proceedings of National Academy of Science w USA i dostępnej na stronie www:

<http://www.pnas.org/content/114/13/3305.abstract>.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Praca doktorska mgr inż. Jerzego Jegiera odwołuje się do prac Maslova a w szczególności do jego pracy doktorskiej *'Reversible Logic Synthesis'* z 2003 roku, jak również do prac późniejszych np. *'Synthesis of the Optimal 4-bit Reversible Circuits'*, Oleg Golubitsky, Sean M. Falconer i Dmitri Maslova dostępnych np. arXiv:1003.1914v1 z 2010 roku. Warto podkreślić, że w ostatnim czasie Maslov stosując podobną metodykę badawczą jak mgr Jegier podjął zagadnienie eksperymentalne co jest opisane w pracy *'Experimental Comparison of Two Quantum Computing Architectures'* z 2017 roku dostępnej na przykład w: <https://arxiv.org/abs/1702.01852>.

Praca mgr Jegiera zawiera podstawy teoretyczne i może stanowić bazę do dalszych prac nad komputerami kwantowymi. Odwołuje się jednak bardziej do komputerów klasycznych niż kwantowych i prezentowane przez Autora podejście jest podejściem semiklasycznym. Tak naprawdę jest to praca doktorska z matematyki dyskretnej mająca swoje znaczenie dla elektroniki.

8. Ocena końcowa

Praca doktorska Pana Jerzego Jegiera „*Synteza odwracalnych układów logicznych oparta na wyrażeniach PPRM*” wykazuje pewne podobieństwo z metodologią stosowaną w doktoracie „*Metoda redukcji kosztu kwantowego binarnych układów odwracalnych*” obronionej w 2013 roku przez dr inż. Marka Szyprowskiego.

W swojej pracy Doktorant Jerzy Jegier (oraz poprzednio dr Szyprowski) zastosował uproszczenie bramek kwantowych (nie uwzględnił żadnych efektów pasożytniczych). Dekoherecja i efekty kwantowego splątania mają znaczenie dla wyników otrzymanych w pracy doktorskiej. Należy podkreślić, że bramki kwantowe są znacznie mniej odporne na szum niż bramki klasyczne.

Dlatego konieczna jest korekcja błędów i dlatego do tej pory nie wiadomo czy uda się zbudować komputer kwantowy. Warto tutaj zapoznać się z pracą J. Martinisa <https://arxiv.org/abs/1411.7403>.

Należy też zauważyć, że Hamiltonian danego układu (np. fizycznie zaimplementowanej bramki kwantowej) generuje określone kumulanty szumu o czym pisze Wolfand Belzig w swoim wykładzie Full Counting Statistics (FCS):

http://tfp1.physik.uni-freiburg.de/eu_www/Miraflores/lecturenotes/WolfgangBelzig_Talk.pdf.

Wyniki rozprawy zostały opublikowane w pracach:

[Jegier, Kerntopf i Szyprowski, 2013], [Jegier i Kerntopf, 2014], [Jegier i Kerntopf, 2014], [Jegier i Kerntopf, 2016], [Jegier i Kerntopf, 2017].

W tym miejscu mam następujące pytania do mgr inż. Jerzego Jegiera:

1. Jak opisać dekoherencję w pojedynczej bramce Fredkina i pojedynczej bramce Tofolliego?
2. Jak dekoherencja zmieni opis wielu bramek Fredkina i Tofolliego i jak zmieni sformułowane twierdzenia?
3. Jak fizycznie tzn. za pomocą równań opisać trwałość wzbudzonego stanu w atomie wodoru i zewnętrzne czynniki mające wpływ na jego deekscytację.
4. W jaki sposób można zbudować bramkę Fredkina i Tofolliego z bardziej elementarnych bramek kwantowych?

Należy podkreślić, że pierwsze trzy rozdziały doktoratu mają dużą wartość dydaktyczną a istotnym osiągnięciem Autora jest tabela 5.1-5.7 oraz twierdzenia i lematy z rozdziału siódmego.

Rozprawa mgr inż. Jerzego Jegiera ma charakter teoretyczny, a sposób prezentowania rozwiązanych już problemów i problemów rozwiązanych przez Autora świadczy o głębokiej wiedzy w zakresie współczesnych metod syntezy odwracalnych układów logicznych. Autor wykazuje doskonałą znajomość literatury z tej dziedziny. Cel rozprawy osiągnięto przy użyciu właściwych metod badawczych.

W konkluzji stwierdzam, że praca mgr inż. Jerzego Jegiera pod tytułem: **“Synteza odwracalnych układów logicznych oparta na wyrażeniach PPRM”** spełnia z nadmiarem wymagania Ustawy o tytule i stopniach naukowych stawiane rozprawom doktorskim. Wnioskuje, zatem o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

9. Uwagi szczegółowe:

- Na stronie 19 warto wyboldować zdanie „W literaturze funkcja odwracalna jest przedstawiana jako permutacja na zbiorze $\{0,1\}^n$ ”.
- Niektóre funkcje jak hwbn czy curf2 i urf3 są prezentowane w mało przejrzysty sposób.
- Lemat 2.1 ze strony 21 powinien dotyczyć wyłącznie funkcji odwracalnych o czym Autor zapomniał wspomnieć.
- Zamiast powszechnie znanego terminu iloczyn Autor używa terminu „kostki” co jest mało eleganckie i niezbyt jednoznaczne.
- Rozdział drugi ma dużą wartość dydaktyczną. Szczególnie elegancki matematycznie zapis bramek jest zawarty na stronach 28 i 29.
- Praca nie zawiera słownika stosowanych pojęć i odniesienia, na której stronie pracy doktorskiej są określone definicje. Szczególnie przydałaby się jedna strona z definicjami: PPRM, ESOP, MCT, GC, QC, PMWM, HWB, hwb.
- Autor powinien jawnie zdefiniować permanent macierzy kwadratowej.
- Dobrze było by podać precyzyjną definicję akronimu PMWM. Inaczej Czytelnik musi „biegać” pomiędzy stronami i jest to uciążliwe i zajmujące uwagę i czas.
- Rozdział 6 definiuje hwb i HWB co powinno mieć miejsce wcześniej.
- Autor spodziewa się, że Czytelnik kierunku elektronika zna definicję funkcji będącej permanentem macierzy kwadratowej (permanent_nxn). Taką definicję należało zamieścić w pracy a nie tylko odsyłać Czytelnika do literatury.
- Rozdział 7 zawiera wiele rozważań technicznych. Przykładowo zawiera palindromiczne bramki układy gmf_n i wskazuje układy gmf_n o minimalnej liczbie bramek (Rys.7.3). Niestety Autor nie definiuje gmf_n należycie tylko odsyła Czytelnika do zasobów literaturowych w Internecie co utrudnia ocenę pracy Autora.
- Oddzielna strona pracy doktorskiej powinna zawierać wskazania do wszystkich funkcji definiowanych w doktoracie.



Podpis