

Dr hab. inż. Stanisław Deniziak
Prof. nadzw. PŚk
Katedra Systemów Informatycznych
Politechnika Świętokrzyska
ul. 1000-lecia Państwa Polskiego 7
25-539 Kielce

Kielce, 17.07.2021

**Recenzja rozprawy doktorskiej dla Rady Dyscypliny Naukowej
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Wojskowej Akademii
Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego**

Tytuł rozprawy: Synteza logiczna funkcji boolowskich szczególnej postaci

Autor rozprawy: mgr inż. Tomasz Mazurkiewicz

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Tadeusz Łuba

1. Cel, zakres i charakter rozprawy

Rozprawa dotyczy problematyki implementacji sprzętowej funkcji generowania indeksów. Funkcje te mają charakterystyczne cechy takie jak wysoki stopień nieokreśloności i duża liczba wejść. Cechy te stwarzają duże możliwości minimalizacji. Ze względu na szerokie zastosowania tych funkcji w takich dziedzinach jak telekomunikacja czy cyberbezpieczeństwo, gdzie istotna jest szybkość przetwarzania, implementacja sprzętowa funkcji generowania indeksów jest uzasadniona. W pracy skupiono się na implementacji funkcji w pamięciach RAM/ROM. Problem ten jest szczególnie istotny gdy docelową technologią implementacji są układy FPGA, które są zwykle wyposażone w wiele konfigurowalnych bloków pamięci. Ich efektywne wykorzystanie może stanowić interesującą pod względem kosztu i szybkości działania alternatywę dla tradycyjnej implementacji w formie bramek logicznych.

Punktem wyjścia do problemu opisywanego w pracy jest stwierdzenie, że istniejące metody syntezy funkcji generowania indeksów często dają wyniki dalekie od najlepszych. Dlatego autor skupił się na analizie istniejących rozwiązań i poszukiwaniu możliwości zwiększenia ich efektywności. Badania były prowadzone w trzech kierunkach: zwiększenie efektywności dekompozycji liniowej, obniżenie kosztu implementacji stosowanych architektur oraz zastosowanie dekompozycji funkcjonalnej. Autor zauważył, że wszystkie ww. kierunki badań mogą prowadzić do uzyskania lepszych, tzn. o mniejszym zapotrzebowaniu na pamięć, implementacji funkcji generujących indeksy. Polepszenie wyników będzie możliwe poprzez: wykorzystanie zbiorów niezgodności, zastosowanie struktur probabilistycznych oraz wybór najefektywniejszej strategii dekompozycji funkcjonalnej. Swoje obserwacje dotyczące możliwości ulepszenia istniejących podejść doktorant sformułował w postaci 3 tez pracy:

- „1. Zbiory niezgodności wykorzystane mogą być do poszukiwania dekompozycji liniowej funkcji generowania indeksów.*
- 2. Możliwa jest realizacja funkcji generowania indeksów z wykorzystaniem struktur probabilistycznych, charakteryzująca się niewielkim wykorzystaniem pamięci.*
- 3. Dekompozycja funkcjonalna pozwala na realizację funkcji generowania indeksów, dla których nie istnieje optymalna dekompozycja liniowa”.*

Celem pracy było opracowanie metod syntezy funkcji generujących indeksy, minimalizujących zajętość pamięci, wymaganą na implementację tych funkcji w blokach RAM/ROM. Zakres pracy obejmuje opracowanie modyfikacji dekompozycji liniowej z wykorzystaniem zbioru niezgodności, modyfikację proponowanej architektury o struktury probabilistyczne znacząco zmniejszające zajętość pamięci, zastosowanie dekompozycji funkcjonalnej do dekompozycji funkcji generujących indeksy. Efektywność opracowanych metod została oceniona poprzez wykonanie syntezy dla przykładowych funkcji standardowych oraz funkcji wygenerowanych losowo.

Praca ma charakter teoretyczno-doświadczalny. Bazując na formalnych modelach reprezentacji i dekompozycji funkcji boolowskich, autor opracował algorytmy i kryteria optymalizacji rozwiązań. Następnie efektywność opracowanych metod ocenił na podstawie szeregu eksperymentów dla zbiorów funkcji generujących indeksy.

2. Zawartość rozprawy

Rozprawa składa się z 6 rozdziałów, bibliografii oraz spisów rysunków i tabel. Pierwszy rozdział zawiera wprowadzenie do tematyki rozprawy i przegląd istniejących rozwiązań, zawiera również motywację i tezę rozprawy. Drugi rozdział zawiera opis podstawowych pojęć i definicji związanych z tematyką rozprawy. W trzecim rozdziale autor przedstawił problematykę dekompozycji liniowej. Przedstawił istniejące rozwiązania oraz zaproponował autorskie modyfikacje metody mające na celu zmniejszenie zajętości pamięci. W rozdziale tym są również zaprezentowane wyniki wykonanych eksperymentów oceniających efektywność zastosowanych rozwiązań. Czwarty rozdział zawiera opis zaproponowanej w literaturze architektury układu implementującego funkcje generujące indeksy. W rozdziale tym autor przedstawił też modyfikacje tej architektury wykorzystujące struktury probabilistyczne. W piątym rozdziale został przedstawiony problem dekompozycji funkcjonalnej ukierunkowanej na implementację funkcji w blokach pamięci. Autor przedstawił tu również metody optymalizacji i wyniki eksperymentów porównujących skuteczność przedstawionych metod. Rozdział szósty zawiera podsumowanie pracy i kierunki dalszych badań.

3. Poprawność i oryginalność postawionej tezy, stopień w jakim teza została wykazana

Autor sformułował 3 niezależne tezy pracy. Jednak ponieważ dotyczą one optymalizacji 3 różnych sposobów implementacji funkcji generujących indeksy, ich wspólnym elementem jest problem minimalizacji zajętości pamięci niezbędnej do implementacji tych funkcji. W ogólnym ujęciu tezy pracy są poprawne i oryginalne, jednak sposób ich sformułowania jest niezbyt precyzyjny. W przypadku pierwszej tezy samo wykazanie użyteczności jakiegoś mechanizmu, w tym przypadku zbiorów niezgodności, nie jest wystarczające. Teza powinna też wskazywać na korzyści z zastosowania tego mechanizmu. Przykładowymi korzyściami mogłyby być: większa skuteczność dekompozycji, mniejsza złożoność obliczeniowa, łatwiejsza implementacja, mniejsze wymagania pamięciowe itp. Takie doprecyzowanie tej tezy podkreśliłoby celowość tego kierunku badań. W drugiej tezie autor użył mało precyzyjnego pojęcia „*charakteryzująca się niewielkim wykorzystaniem pamięci*”. Pomijając fakt, że pojęcie „*niewielki*” jest pojęciem względnym to tak sformułowana teza wcale nie wskazuje na to, że tego typu rozwiązania będą lepsze od istniejących. Dlatego w tym miejscu bardziej precyzyjne byłoby sformułowanie wskazujące na to, że zastosowanie struktur probabilistycznych pozwoli na zmniejszenie/redukcję wykorzystania pamięci. Również trzecia teza nie jest sformułowana wystarczająco precyzyjnie. Po pierwsze funkcję generującą

indeksy można zrealizować również bez stosowania jakiegokolwiek dekompozycji. Po drugie, w tej tezie również nie jest zawarty cel stosowania tej dekompozycji. Bardziej precyzyjnie tezę można było sformułować wskazując na to, że dekompozycja funkcjonalna pozwoli na uzyskanie redukcji wykorzystania pamięci w przypadkach gdzie dekompozycja liniowa nie jest skuteczna.

Pomimo niezbyt precyzyjnie sformułowanych tez pracy, autor wykazał słuszność wszystkich tez, również wykazując korzyści wynikające z zastosowania rozwiązań zaproponowanych w tezach. Świadczy to tym, że autor miał świadomość jaki powinien być sens stawianych tez i jedynie je nieprecyzyjnie sformułował. Tezy zostały udowodnione poprzez opracowanie rozwiązań minimalizujących zajętość pamięci w realizacjach funkcji generujących indeksy oraz wykonanie obszernych i obiektywnych eksperymentów pokazujących korzyści z zastosowanych metod. Autor wykazał, że przedstawione metody syntezy są efektywne, prowadzą do uzyskania często wyników lepszych niż za pomocą dotychczas stosowanych metod.

4. Analiza źródeł

Wykaz bibliograficzny obejmuje 100 pozycji, z czego 13 jest autorstwa lub współautorstwa autora rozprawy. Około 85% pozycji są to publikacje naukowe o zasięgu międzynarodowym. Ponad 70% pozycji bibliograficznych obejmuje pozycje z ostatnich 10 lat, świadczy to o aktualności tematyki rozprawy a także o tym, że problematyka pracy jest przedmiotem badań dopiero od kilkunastu lat.

Autor w rozprawie przedstawił krótki przegląd istniejących rozwiązań we wstępie, wskazując na ich wady, co stanowiło motywację do podjęcia badań będących przedmiotem rozprawy. Ponadto na początku każdego z rozdziałów wymienił najbardziej znane rozwiązania, odwołując się do literatury i opisując jedynie rozwiązania, które stanowiły punkt wyjścia do badań realizowanych przez autora. Ze względu na to, że tematyka rozprawy dotyczy trzech kierunków badań, takie podejście można uznać za poprawne, dzięki temu rozprawa jest zwięzła i przejrzysta.

Wykaz literatury jest obszerny i zawiera wszystkie istotne publikacje z zakresu tematyki rozprawy związanej z implementacją funkcji generujących indeksy, chociaż bibliografia mogła by być uzupełniona o kilka pozycji, takich jak:

Y. Matsunaga, "Synthesis algorithm of parallel index generation units," *2014 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, 2014, pp. 1-6, doi: 10.7873/DATE.2014.310.

J. T. Butler and T. Sasao, "Realizing all Index Generation Functions by the Row-Shift Method," *2019 IEEE 49th International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL)*, 2019, pp. 138-143, doi: 10.1109/ISMVL.2019.00032.

T. Sasao, "Cyclic row-shift decompositions for incompletely specified index generation functions", *The 22nd International Workshop on Logic Synthesis (IWLS)*, June 7-8, 2013.

T. Sasao, "Row-shift decompositions for index generation functions" in *Design Automation and Test in Europe (DATE-2012)*, Dresden, Germany, pp. 1585-1590, March 2012.

Tematyka tych prac prezentuje metody, które może nie zyskały większej popularności, ale odniesienie do tych rozwiązań stanowiłoby uzupełnienie przeglądu metod dekompozycji funkcji generujących indeksy.

5. Pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i/lub stanu techniki reprezentowanych przez literaturę światową

W rozprawie autor odnosi się do aktualnego stanu wiedzy z zakresu implementacji w blokach pamięci RAM/ROM funkcji generujących indeksy. Biorąc pod uwagę krytyczną ocenę najefektywniejszych rozwiązań, autor zaproponował szereg modyfikacji znacząco ulepszających te rozwiązania. Zatem badania przedstawione w rozprawie stanowią rozszerzenie i kontynuację aktualnych prac realizowanych w zespołach prof. Łuby oraz prof. Sasao. Zaprezentowane wyniki badań są porównywane z wynikami otrzymanymi za pomocą metod znanych z literatury światowej. Uzyskane wyniki są porównywalne a w wielu przypadkach lepsze od wyników uzyskanych za pomocą istniejących metod. W szczególności autor uzyskał znaczące wyniki w zakresie:

1. Polepszenia jakości metody dekompozycji liniowej poprzez zastosowanie zbiorów niezgodności i zaproponowanie 2 podejść nazwanych First Fit oraz MinR.
2. Modyfikację architektury IGU poprzez zastosowanie struktur probabilistycznych w formie filtrów Blooma i Cuckoo, znacząco zmniejszających wymagania pamięciowe architektury.
3. Zastosowanie metody dekompozycji funkcjonalnej do funkcji, dla których dekompozycja liniowa nie daje zadowalających wyników. Zaproponowanie metod heurystycznych oraz metody dokładnej.

Ww. rozwiązania są oryginalnymi propozycjami w zakresie syntezy funkcji generujących indeksy implementowanych w blokach pamięci. Stanowią one istotny wkład w rozwój prac nad dekompozycją i implementacją sprzętową takich funkcji.

6. Znaczenie uzyskanych wyników dla danej dyscypliny naukowej

Wynikiem pracy były oryginalne metody dekompozycji i implementacji funkcji generujących indeksy. Opracowane metody zostały ocenione przez autora poprzez wykonanie eksperymentów i porównanie ich z metodami znanymi z literatury. Biorąc pod uwagę zajętość pamięci, średnio wyniki okazały się lepsze od wyników uzyskanych za pomocą znanych metod. Potwierdziło to wysoką wydajność zaproponowanych rozwiązań. Tym nie mniej autor wskazał dalsze możliwości badań, mających na celu dalsze ulepszenia metod dekompozycji i implementacji funkcji generujących indeksy.

Istotną zaletą rozprawy jest szeroki zakres badań wykonanych przez autora, pozwalających nie tylko na znalezienie najlepszych metod implementacji ale również na pozyskanie wiedzy z zakresu problematyki implementacji funkcji generujących indeksy. Autor nie ograniczył się do zaproponowania jednego rozwiązania o zadowalającej wydajności ale wykonał badania wielu alternatywnych podejść i wykazał ich wady i zalety. Jest to istotny wkład w rozwój informatyki w zakresie badania własności funkcji generujących indeksy.

7. Umiejętności autora do poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych wyników

Autor w sposób zwięzły przedstawił zagadnienia przedstawione w pracy. Większość zagadnień jest wyjaśniana na przykładach. Do opisów formalnych autor wykorzystał istniejące i powszechnie stosowane modele formalne. Przejrzystość pracy byłaby większa gdyby definicje podstawowych pojęć zostały wyodrębnione z tekstu i ponumerowane.

Praktyczna skuteczność opracowanych rozwiązań została wykazana poprzez szereg wykonanych eksperymentów pokazujących nie tylko wydajność zaproponowanych metod, ale

także ich złożoność obliczeniową i inne własności pozwalające na obiektywną ocenę tych metod.

Praca jest przygotowana starannie, nie zawiera wielu błędów redakcyjnych, zdarzają błędy językowe i drobne błędy techniczne. Rysunki i wykresy są przygotowane dobrze i dobrane poprawnie, ilustrując opisywane metody i prezentując uzyskane wyniki.

8. Główne wady i słabe strony rozprawy

W rozprawie nie znalazłem istotnych błędów merytorycznych, wyniki wykonanych eksperymentów potwierdzają słuszność tez rozprawy. Jednak w kontekście niektórych wyników i wniosków nasuwają się pewne spostrzeżenia, które nie zostały w pełni wyjaśnione lub przedyskutowane:

1. Praca prezentuje trzy różne podejścia do implementacji funkcji generujących indeksy. Czy są jakieś metody/strategie, pozwalające na wybór optymalnej metody implementacji dla danej funkcji? W pracy brakuje porównania wszystkich trzech podejść, np. pod kątem kosztu implementacji. Przykładowo, interesujące mogłoby być porównanie wyników syntezy dla reprezentatywnego zestawu funkcji wszystkimi trzema metodami.
2. Dekompozycję funkcjonalną proponuje się wykonywać dla funkcji, dla których nie istnieje optymalna (minimalna) dekompozycja liniowa. Czy zdarzają się przypadki funkcji dla których nie istnieje optymalna dekompozycja liniowa a i tak taka implementacja będzie tańsza od dekompozycji funkcjonalnej?
3. Czym się różni dekompozycja funkcjonalna funkcji generującej indeksy od dekompozycji funkcjonalnej dowolnej funkcji boolowskiej? Czy istniejące metody dekompozycji funkcjonalnej dają znacząco gorsze wyniki?
4. Dla funkcji wielowyjściowych możliwa jest też dekompozycja równoległa. Czy jest sensowne zastosowanie takiej dekompozycji do optymalizacji funkcji generujących indeksy? Czy są tu możliwości optymalizacji implementacji?
5. W przypadku architektur IGU z zastosowaniem struktur probabilistycznych podano minimalne wartości prawdopodobieństwa wyniku fałszywie pozytywnego dla którego proponowane rozwiązanie jest już opłacalne. Ale badania te odniesiono tylko do klasycznej architektury IGU. Bardziej interesujące byłoby podanie informacji jakie jest minimalne prawdopodobieństwo dla którego architektura ta byłaby konkurencyjna dla architektur generowanych przez metody dekompozycji liniowej czy funkcjonalnej.

Ponadto rozprawa zawiera wiele drobnych błędów językowych i nieścisłości merytorycznych. Szczegółowe uwagi:

1. Str. 1 – „Data Science” należałoby przetłumaczyć jako „nauka o danych” a nie „wiedza o danych”.
2. Str. 5 w pierwszej tezie zamiast „wykorzystane mogą być” powinno być „mogą być wykorzystane”.
3. Str. 8 i następne – często „k” i „K” jest używane zamiennie, należałoby to ujednolicić.
4. Str. 8 – w definicji GD, GD_i użyto pojęcia „liczba zmiennych do reprezentacji funkcji”, należałoby to wyjaśnić czy chodzi o zmienne wejściowe czy wyjściowe, czy binarne/boolowskie czy wielowartościowe.
5. Str. 11 – we wzorze na przechodniość na końcu powinno być aRc (zamiast bRc).
6. Str. 19 – brakuje opisu na czym polega redukcja zmiennych funkcji wejściowej.
7. Str. 19 – wprowadza się pojęcie macierzy rozróżnialności, powinna być przytoczona definicja tej macierzy.

8. Str. 27 – dla wszelkich wyników pomiarów czasowych wykonania obliczeń powinny być podane podstawowe parametry sprzętu na jakim wykonano obliczenia. W tym miejscu te informacje podano tylko dla metody First Fit.
9. Str. 28 – zwrot „rozwiązanie optymalne nie istnieje” jest nielogiczny. Rozwiązanie optymalne należy rozumieć jako rozwiązanie najlepsze, które zawsze istnieje. Jest to niefortunne użycie pojęcia „optymalne” do określenia rozwiązania o minimalnej liczbie zmiennych wejściowych. Myślę, że tu należałoby użyć innego pojęcia.
10. Str. 29 – w tabeli 3.10 brakuje kolumny z wynikami dla $M=5$ (a jest opis w tekście).
11. Str. 35 – ostatni akapit jest nielogiczny. Jeśli wykazano brak istnienia dekompozycji to żadna nowa metoda nie znajdzie czegoś co nie istnieje. Tu należałoby doprecyzować, że chodzi o metody znajdujące inną architekturę niż ta uzyskana na drodze dekompozycji liniowej.
12. Str. 37 – „... dla $p_k-q=1$ albo p_k-2 ..” sens?
13. „... wadą architektury tej architektury ..” – pleonazm.
14. Str. 40 – w komentarzu do rys. 4.4b podane jest że stosunek wielkości pamięci osiąga wartość 3 podczas gdy na rysunku maksymalna wartość to 0.8.
15. Str. 42 – przyjęto że wartości h_i rozpoczynają się od 0 a numeracja bitów rozpoczyna się od 1, zatem powinno być „... gdy $h_2(v)$ ma wartość sześć to .. gdyż siódmy bit ..”
16. Str. 44 – zamiast „urządzenia o ograniczonym dostępie do zasobów logicznych” powinno być „urządzenia o ograniczonej liczbie zasobów logicznych”.
17. Str. 45 – „Istotną wadą filtru ... niż w przypadku klasycznego filtru”. Czym się różni „filtr” od „klasycznego filtru”?
18. Str. 47 – „wektorów wejściowy” => „wektorów wejściowych”.
19. Str. 72 – zastosowanie cytatu chyba jest nieuzasadnione. Tłumaczenie dobrze odzwierciedla sens definicji i nie ma potrzeby przytaczać oryginalnej definicji.
20. W niektórych miejscach autor używa niewłaściwych operatorów matematycznych, np. przynależność do zbioru zamiast zawieranie się zbiorów.

Wyżej wymienione błędy i uwagi nie umniejszają wysokiej jakości rozprawy i uzyskanych wyników. Autor opracował metody i uzyskał wyniki konkurencyjne do znanych z literatury światowej. Zaprezentowana metodyka badań jest poprawna i zgodna z ogólnie przyjętymi zasadami prowadzenia badań. Z tych względów rozprawę oceniam bardzo dobrze.

9. Wnioski końcowe

Podsumowując, uważam że recenzowana rozprawa doktorska przedstawia oryginalne rozwiązania zaprezentowanych w niej zagadnień naukowych. Autor podjął w niej problem, który ma istotne znaczenie w dziedzinie Informatyki jak i Elektroniki. Trafnie określił założenia dotyczące jego analizy i potwierdził je wykonanymi eksperymentami. Wykazał się dobrą znajomością ogólnej wiedzy teoretycznej z zakresu tematyki pracy, a także umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Stwierdzam, że recenzowana praca w pełni spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim i niniejszym wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

