Biuro Dziekana
Wpłynęło dnia 4.10.21
Nr 311 / zał.

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji

INSTYTUT TELEKOMUNIKACJI

Dr hab. inż. Piotr CHOŁDA, prof. AGH

Kraków, dn. 28 września 2021 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: *Energooszczędny dekoder kodów LDPC implementowany w układzie FPGA*
Autor rozprawy: mgr inż. Mateusz KUC

1. WSTĘP

Niniejsza recenzja została przygotowana na potrzeby postępowania ws. nadania stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych. Postępowanie prowadzi Rada Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Śląskiej w Gliwicach (Pol. Śl.). Pełną dokumentację dot. rozprawy doktorskiej, wraz z informacją o powołaniu przez Radę Dyscypliny na recenzenta rozprawy, otrzymałem od p. dr. hab. inż. Zbigniewa KACZMARCZYKA, prof. Pol. Śl. (Zastępcę Przewodniczącej Rady Dyscypliny), w dn. 5 sierpnia 2021 r.

Recenzowana rozprawa została złożona przez p. mgr. inż. Mateusza KUCA. Nosi tytuł „Energooszczędny dekoder kodów LDPC implementowany w układzie FPGA" i została napisana w całości po polsku. Promotorem doktoratu jest p. prof. dr hab. inż. Dariusz KANIA. Promotorem pomocniczym doktoratu jest p. dr hab. inż. Wojciech Sułek, prof. Pol. Śl.

Dostarczona mi rozprawa doktorska liczy 125 stron. Składa się z sześciu numerowanych rozdziałów: 1. Wstęp (str. 1-7), 2. Kody LDPC (str. 8-28), 3. Straty mocy w układach cyfrowych (str. 29-36), 4. Implementacja energooszczędnego dekodera LDPC w układzie FPGA (str. 37-76), 5. Badania eksperymentalne (str. 77-107), 6. Podsumowanie (str. 110-112). Oryginalne wyniki zasadniczo ujęto w rozdziałach 4-5. Uzupełnieniem zawartości pracy są: zamieszczone na początku wykaz ważniejszych oznaczeń, wykaz ważniejszych skrótów, spisy tabel i rysunków; jak również zawarta na końcu i ułożona w kolejności cytowania bibliografia licząca 150 pozycji. W pracy zamieszczono również liczne rysunki oraz tabele, które służą podsumowaniu prezentowanej wiedzy zastanej oraz wizualizacji parametrów prowadzonych eksperymentów, jak również uzyskanych wyników.

Poniżej odnoszę się do różnych elementów oceny rozprawy doktorskiej, którymi zwyczajowo się posługuję (na podstawie formularza opracowanego kiedyś w Politechnice Warszawskiej).

Recenzja została sporządzona w oparciu o obowiązujące Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce, z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. 30.08.2018 r. Poz. 1668).

Akademia Górniczo-Hutnicza | Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Instytut Telekomunikacji
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,
tel. +48 12 617 39 37, fax +48 12 634 23 72
e-mail: kt@agh.edu.pl, www.agh.edu.pl

2. Cel badań (w odniesieniu do tezy rozprawy). Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora?

Zagadnienie naukowe mieści się w obszarze elektroniki, chociaż poza niego wykracza. Z punktu widzenia aplikacyjnego problematyka dotyczy projektowania układów elektronicznych służących do obsługi kodów korekcyjnych proponowanych przez współczesną teleinformatykę (zwracam na to uwagę, gdyż praca z tego punktu widzenia mogłaby również być broniona w ramach dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja, która jest mi najbliższa i co zapewne będzie widać w rozłożeniu akcentów w ramach niniejszej recenzji). Doktorant zajmuje się bardzo ważną klasą współcześnie intensywnie badanych, używanych oraz standaryzowanych blokowych liniowych kodów korekcyjnych, mianowicie kodów opartych na macierzach kontrolnych o małej gęstości LDPC (and. *light density parity check*). Doktorant stawia sobie za cel nie tylko opracowanie dekodera dla takich kodów (co samo w sobie nie byłoby zadaniem oryginalnym), ale skupia się na aspekcie energooszczędności, co czyni zagadnienie niebanalnym oraz doniosłym. Kluczowy aspekt minimalizacji użycia energii stanowi w praktyce ogromne wyzwanie w odniesieniu do urządzeń Piątej Generacji 5G czy nawet planowanej już 6G (np. małe sensory o ograniczonych bateriach itd.). Taki wybór tematyki wskazuje na rozeznanie, co jest istotne z punktu widzenia tematyki zastosowań elektroniki na potrzeby teleinformatyki i zasługuje na uznanie.

W zakresie oceny sformułowania tezy można wyjść od tego, że użycie zaawansowanych kodów o dobrych parametrach korekcyjnych (jak w przypadku kodów LDPC) wymaga intensywnego przetwarzania miękkodecyzyjnego, aby być w stanie efektywnie korygować przekłamania. Ze względu na wysoką wartość odległości Hamminga kody LDPC oferują taki potencjał, jednakże przetwarzanie na poziomie dekodowania wymaga właśnie użycia potencjalnie dużej ilości energii (zwiększenie złożoności procedur pociąga zwiększenie złożoności układów, a to zwiększa pobór energii). Niemniej jednak w celu pożądanej konstrukcji dekodera można wykorzystać specyficzne właściwości macierzy kontrolnej kodów LDPC. Od strony praktycznej Doktorant musiał oprzeć się na układach sprzętowych, które mógłby wygodnie konfigurować, stąd (jak można się domyślać, bo kwestia ta nie jest wprost wypowiedziana) wybór układów FPGA. W związku z tym Doktorant sformułował następującą tezę rozprawy: „Istnieje możliwość implementacji energooszczędnych dekoderów kodów LDPC w strukturach FPGA bez pogorszenia ich własności korekcyjnych." Doktorant podstawił sobie jako cel dowiedzenie tej tezy przez skonstruowanie uniwersalnej architektury dekoderów kodów LDPC w taki sposób, żeby zapewniały one niski pobór energii (głównie w oparciu o „oszczędne" użycie sygnału zegarowego), ale aby jednocześnie zapewnić pożądaną jakość z punktu widzenia parametrów korekcyjnych.

Teza jest **jasno postawiona** i mimo modalnego charakteru (co obecnie jest bardzo często praktykowane w naukach technicznych) zawiera wprost odniesienie do istotnego w tym przypadku elementu kompromisu, tj. użycia energii vs. jakość kodu. Z tego powodu wskazuje jasno, co konkretnie ma zostać osiągnięte w ramach konstrukcji.

3. **Charakter rozprawy. Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

Ze względu na nastawienie praktyczne Doktoranta sposób dowodzenia tezy determinuje charakter konstrukcyjny oraz doświadczalny całej rozprawy. Mianowicie, Doktorant proponuje konkretne rozwiązanie układu dekodera (nie skupia się na kodowaniu, ale takie ograniczenie jest jak najbardziej dopuszczalne) i pokazuje z użyciem licznych eksperymentów na skonstruowanym układzie, że jego rozwiązanie wykazuje różne pożądane cechy (przede wszystkim odnoszące się do sformułowanej tezy).

W przypadku zagadnienia będącego przedmiotem rozprawy założony charakter pracy jest jak najbardziej słuszny. Trudno sobie nawet wyobrazić, żeby inaczej rozwiązywać postawiony w tezie problem. Na pewno założony sposób **konstrukcyjno-doświadczalny** ma wysoki walor wiarygodności.

4. **Sposób przeprowadzenia analizy źródeł. Sposób sformułowania wniosków wynikających z analizy źródeł. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadczący o dostatecznej wiedzy Autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonywujący?**

Nie mam wątpliwości, że Doktorant posiada odpowiednią wiedzę nt. kodów LDPC oraz metod konstruowania układów elektronicznych służących obsłudze ich dekodowania. Na jego **doskonałe rozeznanie w literaturze światowej oraz stanie wiedzy** wskazuje oczywiście obszerna bibliografia pracy (cytowane 150 prac, praktycznie wszystkie anglojęzyczne, w przeważającej większości aktualne). Nie znajduję, przynajmniej w zakresie obszaru kodowania, istotnych artykułów, które byłyby pominięte. Doktorant cytuje ważne i adekwatne teksty. Literatura na ten temat jest obszerna, oczywiście można zapewne doszukać się pewnej liczby niezacytowanych (a istotnych dla tego tematu) pozycji książkowych (np. Li et al., „LDPC Code Designs, Constructions, and Unification", CUP, Cambridge, UK, 2016), ale nic szczególnie istotnego nie zostało pominięte.

Dobre rozeznanie w tematyce jest również potwierdzone przez trafne ujęcie problematyki oraz sposób przedstawienia rozwiązania postawionego w tezie zagadnienia.

Na krytykę zasługuje jednak sam aspekt sposobu dokonania analizy źródeł. Analiza o charakterze literaturowym jest mianowicie rozproszona w początkowych partiach pracy. Niektóre jest elementy znajdują się nawet we wstępie (rozdz. 1), są obecne przede wszystkim w rozdziałach 2 i 3, w którzy przedstawiono też podstawowe informacje z obszaru wiedzy zastanej (zatem cytowania prac, skądinąd raczej aktualnych, podają literaturę implicite, a nie w postaci jawnej analizy), a nawet w części poświęconej rozwiązaniu oryginalnemu (rozdz. 4). Nie można wprawdzie powiedzieć, żeby Doktorant nie zarysował wprost stanu wiedzy, ale uczynił go raczej fragmentarycznym i nie do końca czytelnym. Byłoby zasadne odróżnić strukturalnie fragmenty opisujące stan techniki od stanu najnowszych badań w tym zakresie (czyli odróżnić *state-of-the-art* od *state-of-the-research*). W tekście rozprawy jest to jednak wymieszane. Odniesienie do literatury przypomina raczej sposób odnoszenia się do niej w sposób przyjęty w krótszych

artykułach naukowych niż w sposób pełny, oczekiwany od rozprawy doktorskiej. Być może wynika to z faktu, że praca opiera się na licznych, publikowanych już we współautorstwie Doktoranta, artykułach naukowych pochodzących z periodyków międzynarodowych. Skutkuje to jednak tym, że w niektórych istotnych z punktu widzenia analizy źródeł fragmentach ma miejsce zagregowane przedstawianie badań opisywanych w różnych źródłach, bez dokładnego omówienia, co pojawiło się w konkretnej pracy. Prowadzi to czasem do zbiorczego cytowania źródeł (np. zbitki typu „[35][36][37][38][39]" na str. 4, „[49][51][52][53][54]" na str. 13, „[65][66][73][74]" na str. 37, czy też „[75][76][77][78][79][80]]" i „[81][82][83][84][85][86]" na str. 38 itd.). Ponadto, w niektórych przypadkach byłoby zasadne zestawienie konkluzji wprost wynikających z analizy zastanej wiedzy i podkreślenie, jak wpływa ona na założenia oraz uwarunkowania rozprawy doktorskiej. Szczególnie w przypadku podrozdziału 3.2 brak mi takiego podsumowania. Fakt rozproszenia analizy literaturowej sprawia również, że brak odwołań w konkretnym fragmencie robi wrażenie, jak gdyby Doktorant nie oddawał w pełni sprawiedliwości prekursorom badań. Np. na str. 4 Doktorant napisał „Jednak większość rozwiązań znanych z literatury nie rozpatruje kwestii związanych z poborem i optymalizacją poboru mocy." Jeśli „większość", to jednak nie wszystkie, byłoby zatem warto wyszczególnić te prace, w których wprost się o takich zagadnieniach pisze. Skądinąd w innych miejscach Doktorant takie prace także cytuje.

Jeśli chodzi o odniesienie do sposobu wprowadzania wiedzy zastanej, to wprawdzie nie mam wątpliwości w odniesieniu do kompetencji Doktoranta, ale biorąc pod uwagę, że rozprawa stanowi zamkniętą całość, znajduję fragmenty które można byłoby poprawić ze względu na odbiór treści. I tak, chociaż sposób wprowadzania pojęć przeważnie jest logiczny i konsekwentny, a opis wiedzy zastanej w niektórych fragmentach ma nawet charakter podręcznikowy, to bywają jednak potknięcia — np. na str. 13 Doktorant użył pojęcia kodu liniowego, a właściwie w ogóle go wcześniej nie wprowadził. W ogólności zagadnienia kodowania niekiedy są potraktowane nieco zbyt skrótowo, szczególnie w odniesieniu do kodów innych niż LDPC. Np. na str. 2 Doktorant odnosi się po prostu od jakiegoś kodu cyklicznego (wybranego jako przykład według bliżej niesprecyzowanych kryteriów), ale przecież kody tego rodzaju to cała wielka klasa; tutaj natomiast potraktowano je w sposób sugerujący że istnieje jakiś jeden wyróżniony kod tego rodzaju, zresztą pomijając fakt, że przecież kody BCH to też kody cykliczne (a o nich Doktorant pisze tak, jak gdyby nie miały ze sobą wiele wspólnego).

Na pewno Doktorant odnosi się do najnowszych typów kodów LDPC (QC-LDPC), co jest najważniejsze. Brak mi jednak odniesienia do takich kodów używanych (lub proponowanych do użycia) w najnowszej praktyce, np. Doktorant niezwykle skrótowo odnosi się do kodów LDPC, które mają być stosowane w systemach 5G. O ile mogę się zorientować, to jedyne odwołania do tekstów nt. zastosowania LDPC w systemach 5G to prace [30] i [31], które zresztą trudno uznać za najbardziej reprezentatywne w odniesieniu do tej problematyki. Akurat w zakresie tej tematyki najlepiej byłoby odwołać się po prostu do dokumentu standaryzacyjnego 3GPP TS 38.212 „Multiplexing and channel coding". Faktem jednak jest, że z punktu widzenia jakościowego to są inne typy kodów niż te, którymi zajmuje się w swojej pracy Doktorant. Byłoby jednak ciekawe wiedzieć, jak sprawdzą się kody standaryzowane dla 5G w architekturze opracowanej przez Doktoranta.

Doktorant nie wspomina też w zasadzie o kodach polarnych (w zasadzie poza jednym przypadkiem — w odniesieniu do pozycji [133] literatury), które stanowią

poza LDPC dużą wielką grupę kodów mających zastosowania w systemach 5G. Na przykład brak ich w zestawieniu porównawczym z rys. 1.1. Faktem jednak jest, że to nieco inna tematyka, chociaż składająca się na istotne tło.

W podsumowaniu tego punktu stwierdzam, że o ile sama analiza literaturowa pozostawia nieco do życzenia, to na pewno sposób potraktowania literatury wskazuje pośrednio na odpowiednią znajomość obszaru, który jest przedmiotem pracy.

5. Rozwiązanie przedstawionego zadania, właściwości przyjętych metod i założeń. Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

W celu dowiedzenia postawionej tezy Doktorant opracował przedstawioną w rozdziale 4 architekturę szeregowo-równoległą dekodera kodów LDPC, która to architektura jest dostosowana do koncepcji iterowanych algorytmów dekodowania korekcyjnego. Algorytmy te opierają się na podejściu tzw. *belief propagation*, co stanowi istotnie podstawę współczesnych koncepcji iteracyjnego dekodowania z korekcją dla kodów blokowych (w tym dla LDPC). Dzięki zastosowaniu wspomnianej architektury Doktorant zapewnia z jednej strony wystarczający poziom prostoty (niemożliwy przy pełnym zrównolegleniu), ale też bez znacznego ograniczania koniecznej przepustowości (co byłoby utrudnione w ramach realizacji z użyciem architektury szeregowej). Opracowana architektura jest niewrażliwa na typ kodu LDPC (tj. może obsługiwać zarówno regularne, jak i nieregularne macierze kontrolne). W zakresie podejścia do kluczowej energooszczędności chodzi o panowanie nad sygnałami zegarowymi w poszczególnych modułach, co ma dawać możliwość lokalnego obniżania częstotliwości sygnału zegarowego (a nawet jego czasowego wyłączania). Doktorant domniemywa, że przypadku dekoderów kodu LDPC ten sposób obniżenia poboru mocy nie musi wiązać się z pogorszeniem ich własności korekcyjnych (stąd teza rozprawy). W związku z tym, że Doktorant zajmuje się systemami FPGA (co jest uzasadnione zakresem ich użycia), skupia się przede wszystkim na minimalizacji poboru mocy dynamicznej, związanej z przełączaniem stanów w układach tworzących całą architekturę.

Rozwiązanie proponowane przez Doktoranta obejmuje jako kluczowe osiągnięcie przede wszystkim opracowanie architektury, ale też sformułowanie własnego sposobu sterowania układem. Główny pomysł stanowi sposób blokowania sygnałów zegarowych, co ma służyć obniżaniu użycia energii. Polega on na posłużenie się układami opartymi na bramkowaniu sygnału zegarowego, dzięki czemu można ograniczyć pobór mocy dynamicznej. Wiąże się to z rozproszeniem systemu sterowania, dzięki czemu cały system jest oparty na mniejszych fragmentach, które są uruchamiane tylko w niezbędnych cyklach. Działają one według dobrze określonej sekwencji, wymuszanej logiką iteracyjnego algorytmu dekodowania. W związku z tym, że wzajemnie uruchamiają się w sposób sekwencyjny, Doktorant nazwał tak opracowaną własną architekturę mianem „Token Ring" na cześć działającego podobnie protokołu telekomunikacyjnego popularnego niegdyś w sieciach lokalnych. Pobudzanie kolejnych elementów sterujących jest zintegrowane z bramkowaniem sygnału zegarowego. Gdy odpowiedni etap obliczeń związanych z dekodowaniem się kończy, wtedy element sterujący pobudza kolejny, a przy tym blokuje sygnał zegarowy w jednostkach, które nie są konieczne do wykorzystania w danym etapie

obliczeń. To ma powodować znaczne oszczędności energetyczne. Pomysł ma duży potencjał i należy ocenić go pozytywnie.

Jeśli chodzi o sposób dowiedzenia, że przedstawione koncepcje istotnie sprawdzą się w praktyce, to — ze względu na chęć dowiedzenia, że proponowana architektura służy obniżeniu użycia energii w porównaniu do architektury pozbawionej proponowanego podejścia — podstawowym podejściem zastosowanym w rozdziale 5, jest realizacja tych samych konfiguracji eksperymentalnych (np. parametry kodu LDPC, liczba bitów służących do reprezentacji przetwarzanych danych, algorytm dekodowania wraz z różnymi podejściami do normalizacji danych) dla architektury proponowanej przez Doktoranta i wersji podstawowej (bez nich). Wyniki są porównywane przede wszystkim z punktu widzenia jednostkowej straty energii, ale Doktorant kontroluje również, czy na odpowiednim poziomie są różne istotne parametry teleinformatyczne, typu przepustowość oraz BER i FER. W konkluzji Doktorant zasadnie stwierdza (po myśli sformułowanej przez siebie tezy rozprawy), że spadek użycia mocy nie wpływa w sposób istotny na parametry korekcyjne kodów. W zakresie badań eksperymentalnych trzeba zwrócić uwagę na ich obszerność oraz pomysłowość. Takie badania trwały bardzo długo, choćby ze względu na użycie różnych konfiguracji, których występuje istotnie bardzo dużo. Ponadto Doktorant musiał rozwiązać wiele problemów szczegółowych (zestawiam je niżej w odniesieniu do oryginalności rozprawy).

W ogólności, w świetle tego, co napisałem wyżej, **można uznać tezę za dowiedzioną prawidłowo w sposób konstrukcyjno-doświadczalny**. Wyniki wskazują, że Doktorant istotnie jest w stanie obniżyć wymagania energetyczne przy braku istotnego pogorszenia parametrów z punktu widzenia wymagań związanych z dekodowaniem.

Mimo mojej ogólnie pozytywnej oceny wykonania prac i sposobu dowodzenia tezy, mam kilka zastrzeżeń, w odniesieniu do których można byłoby jeszcze poprawić metodologię lub opis badań (szereguję od najważniejszych do najmniej istotnych):

- Niestety z tekstu pracy nie wynika jasno, jakie wielkości są właściwie estymowane z użyciem eksperymentów. Można się wprawdzie zdroworozsądkowo domyślać, że np. wyniki mocy to średnie z pewnej liczby pomiarów. Byłoby jednak ważne wiedzieć, że to na pewno tego rodzaju wielkości, ale przede wszystkim jakie odchyłki wystąpiły w toku eksperymentów, ile przeprowadzono powtórzeń z tymi samymi nastawami konfiguracyjnymi, jakie są przedziały ufności itd.
- Przekłamania w kanale są symulowane z użyciem modelu AWGN oraz modulacji BPSK. Są to wprawdzie typowe założenia związane z badaniem ogólnych właściwości kodów korekcyjnych, ale z punktu widzenia współczesnych zastosowań byłoby zasadne, żeby sprawdzić działanie również z innymi typami kanałów oraz sposobów modulacji.
- Nie jest w pełni jasne, skąd wybór konkretnych macierzy kontrolnych przyjętych do badań. Z tego punktu widzenia opis metodologiczny nie jest pełny, ponieważ po przeczytaniu pracy nie byłoby chyba możliwe tylko na podstawie jej treści powtórzenie badań. Doktorant nie zawsze uzasadnia konkretne wybory, np. usztywnienie liczby iteracji do 10, mimo że z punktu widzenia parametrów korekcyjnych byłoby zasadne również uwzględnić tę liczbę jako zmienną konfiguracyjną w przypadku różnych eksperymentów. Nie zawsze wiadomo, skąd wzięły się konkretne parametry (np. użyte dla kodu w sekcji 5.2.2.2). Nie neguję zresztą

samych użytych wartości, ale po prostu brak uzasadnień nt. użycia akurat tych dokładnie liczb nie jest w pełni satysfakcjonujący z punktu widzenia opisu metodologii badań.

- Trudno orzec, na ile przywiązanie Doktoranta do rozwiązań sprzętowych konkretnej firmy (co ma miejsce w przypadku tej rozprawy), ma istotne znaczenia. Zapewne wpływa na charakter ilościowy wyników, ale nie ma podstaw żeby żywić istotne wątpliwości odnośnie ich charakteru jakościowego. W tego rodzaju pracy o charakterze konstrukcyjnym jest to jednak podejście zasadne, gdyż Doktorant oczywiście musiał skupić się na jakichś konkretnych urządzeniach. Byłoby jednak pożądane, gdyby Doktorant przeanalizował różne dostępne układy, tj. sposób konstrukcji rozwiązania w ich oparciu, żeby stwierdzić, czy przypadkiem ich konstrukcja nie wpłynęłaby jakoś istotnie na charakter rozwiązania.
- Myślę, że w przypadku tab. 4 wkradł się błąd na pozycji w wierszu dla P=48 i kolumny TR-Dec/P_{dm} (zapewne chodziło o „97,1" — a nie „9,71"?).

Zastrzeżenia te nie mają jednak fundamentalnego charakteru i nie wpływają na ogólną pozytywną ocenę.

6. Oryginalność rozprawy, samodzielny dorobek autora, pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy (poziom techniki) prezentowanego w literaturze światowej. **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?**

Nie mam wątpliwości nt. **pozytywnej oceny oryginalności rozprawy, jak również wniesienia przez nią (i opublikowanych w trakcie pracy nad nią artykułach naukowych) wartościowego wkładu w stosunku do poziomu techniki** reprezentowanego przez literaturę światową.

Po pierwsze, Doktorant w sposób dojrzały zajął się istotnym zagadnieniem technicznym: skupia się na obecnie najpopularniejszej w badaniach i proponowanym użyciu grupie kodów kwazi-cyklicznych QC-LDPC oraz proponuje rozwiązanie bardzo ważnego i niełatwego zagadnienia praktycznego, jakim jest projektowanie energooszczędnych dekoderów takich kodów.

Po drugie, cele te są zrealizowane w postaci szeregu zadań cząstkowych (które zresztą trafnie podsumowuje sam Doktorant). Dotyczy to zatem (scharakteryzowanych w dużym stopniu we wcześniejszych partiach niniejszej recenzji): opracowania metod optymalizacji dekoderów kodu LDPC pod kątem minimalizacji poboru mocy dynamicznej na wszystkich poziomach opisu układów; opracowania programowego modelu, który umożliwia szybką weryfikację sprzętowego dekodera, realizowane przez porównanie wyników uzyskanych w programowym symulatorze i dekoderze sprzętowym; zaproponowanie architektur regularnych i nieregularnych dekoderów kodów LDPC z zaimplementowanymi algorytmami dekodowania Min-Sum i Normalized Min-Sum w języku opisu sprzętu (tutaj na uwagę zasługuje również oryginalna propozycja dotycząca sposobu normalizowania danych, co jest niezbędnym krokiem w przypadku podejścia do dekodowania opartego na *belief propagation*); opracowania automatycznego

generatora dekoderów różnorodnych kodów LDPC, pozwalającego na tworzenie struktury dekodera po określeniu jego podstawowych parametrów.

Po trzecie, w celu unaocznienia jakości działania zaproponowanego rozwiązania Doktorant opracował środowisko testowe z układem FPGA (w którym realizuje dekoder) i wykonał na nim szereg badań symulacyjnych, dowodząc z użyciem przykładów doświadczalnych, że istotnie jest w stanie zredukować poziom poboru mocy dynamicznej.

Po czwarte, uzysk z rozprawy polega również na eksperymentalnym potwierdzeniu, w jakim kierunku winny być podejmowane różne decyzje konstrukcyjne na styku teleinformatyki (nt. parametrów decydujących o jakości kodu) oraz elektroniki, z których za najważniejsze uznaję: dobór istotnych parametrów macierzy kontrolnej dla kodu QC-LDPC (rozmiar podmacierzy permutacyjnej *P*) istotnie wpływa na zużycie energii przy niewielkim wpływie na parametry korekcyjne (oczywiście w pewnych granicach); sposób wpływu podstawowego parametru kodu (długość słowa) na przepustowość i opóźnienie przetwarzania; zalecenia dotyczące liczby bitów reprezentacji służących w obliczeniach w odniesieniu do kompromisu między użyciem energii a właściwościami korekcyjne.

Po piąte, doceniam również podjętą przez Doktoranta próbę porównania wyników osiągniętych samodzielnie z rozwiązaniami raportowanymi w literaturze (w podrozdziale 5.2.5). Porównanie wychodzi na korzystne w niektórych obszarach dla wyników Doktoranta. Pewną wadą tego podejścia jest, że to porównanie wysoce spekulatywne (zestawione w postaci tabeli 12). Nie jest jasne, czy takie porównanie nie zaniedbuje jakiegoś ważnego czynnika. Inna sprawa, na ile byłoby możliwe w praktyce przeprowadzenie eksperymentów porównawczych, choćby dlatego, że część z porównywanych prac dotyczy układów ASIC (a nie FPGA).

7. Poprawność przedstawienia uzyskanych wyników. Czy Autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonywującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Doktorant bez wątpienia **wykazał bardzo duży poziom umiejętności w zakresie poprawnego i przekonującego sposobu prezentacji wyników**. Na uwagę zasługuje szczególnie zwięzły i czytelny sposób prezentacji treści. Doceniam także poprawność redakcyjną. Praca jest napisana po polsku eleganckim językiem technicznym, bez używania nieprzyjemnego żargonu. Doktorant zadbał o użycie zgrabnych i powszechnie akceptowanych odpowiedników terminów związanych z tematyką pracy. W ogólności (mimo pewnej liczby niżej podanych uwag krytycznych) chcę podkreślić, że edycja jest niezwykle staranna, praktycznie pozbawiona literówek czy innych uchybień. Również interpunkcja jest na wysokim poziomie, co nie jest niestety typowe w przypadku obecnie bronionych prac doktorskich w obszarze nauk technicznych.

Praca zawiera **niewielką** liczbę niedoróbek edycyjnych, które jednak przeważnie nie przeszkadzają w odbiorze. Zestawiam je poniżej.

- Ułożenie niektórych treści pomocniczych w porządku utrudniającym przeszukiwanie, szczególnie w sytuacji gdy czytelnik po prostu chce znaleźć konkretny wpis:

- Wykaz ważniejszych oznaczeń nie został sporządzony według zrozumiałego przeze mnie porządku (na pewno nie jest to porządek alfabetyczny, ale też nie zawsze jest logiczny, np. objaśnienie „$P(c_n|y,H)$" zamieszczono przed objaśnieniem „n").
- Lista pozycji bibliograficznych została ułożona według kolejności cytowania, a nie według nazwiska pierwszego autora tekstu. W przypadku pracy monograficznej jest przyjęty ten drugi typ uporządkowania, który po prostu wykazuje wygodę, jeśli chce się w wersji drukowanej znaleźć konkretną pozycję, co w przypadku 150 pozycji przy zamieszczonym porządku stanowiło dla mnie spore wyzwanie.

- Skoro Doktorant zdecydował się na zamieszczenie wykazu ważniejszych skrótów (co jest bardzo dobrym pomysłem), to dla czytelnika byłoby wygodne, gdyby podał jeszcze polskie odpowiedniki angielskich terminów.
- Rezygnacja ze stosowania krzyżyka na oznaczenie mnożenia w co najmniej jednym przypadku utrudnia zrozumienie treści rysunku: chodzi o rys. 4.15 — nie jest jasne, czy Doktorant ma na myli pewien blok bitów (bP) czy raczej fakt przesłania kilku tablic bitowych (tj. mnożenie liczby i wektora/macierzy $b \times P$); czytelnik może się tego dowiedzieć, ale dopiero z tekstu zamieszczonego dwie strony później.
- Małe niedopatrzenia redakcyjne, typograficzne, językowe, literówki itd.:
  - użycie różnych słów na oznaczenie — jak mi się zdaje — tych samych pojęć („paczka" i „blok" na str. 2), co akurat w przypadku tekstu o charakterze technicznym, od którego wymagana jest przede wszystkim precyzja, nawet kosztem elegancji stylistycznej, nieco zaburza łatwość rozumienia (ale generalnie poza tym przykładem praca jest wolna od takiego problemu);
  - użycie słowa „strumień" w odniesieniu do ciągu bitów na str. 2 jest nieco mylące, gdyż sugeruje że dotyczy ono także kodów blokowych, w przypadku gdy raczej tego słowa używa się w najlepszym przypadku do kodów splotowych (faktem jednak jest że odróżnienie blok/strumień jest bardziej przestrzegane w przypadku szyfrów);
  - na str. 30 zamiast „prędkość przetwarzania danych" należałoby raczej napisać „szybkość przetwarzania danych", bo przecież nie ma mowy o wektorze;
  - brak pełnego i konsekwentnego opisu bibliograficznego:
    - pozycja [129] jest opisana błędnie od strony merytorycznej: standard według mojej wiedzy pochodzi z 1989 roku, ma status „*inactive*" (protokół ma znaczenie historyczne), a w 1998 uzyskał ten właśnie status;
    - nie wiadomo, w jakim periodyku opublikowano pracę [31] (brak informacji, że to IEEE Communications Letters);
    - nie podano typu pracy [13] (najprawdopodobniej praca magisterska);
    - pomylono tytuł czasopisma, w którym ukazała się publikacja [15] (powinno być IEE Proceedings, a nie IEEE Proceedings);

    - brak spójności w opisach bibliograficznych (np. „The 3rd" w przypadku [4] w przeciwstawieniu „2nd" w przypadku [5]);
- użycie łączników zamiast myślników (np. „Kodowanie kanałowe - podstawowe definicje" zamiast „Kodowanie kanałowe — podstawowe definicje" na str. 8, podobnie w wykazach oznaczeń czy skrótów na str. III-V albo „blokowe - strumień" na str. 2), co Doktorant robi dosyć konsekwentnie (chociaż np. na rys. 4.15 używa jednak myślników);
- sklejenie słów lub symboli (np. „macierzy kontrolnej *H*o wymiarach" zamiast „macierzy kontrolnej *H* o wymiarach" w objaśnieniu macierzy *A* na str. III, „1963r." na str. 4; w ogóle konsekwentne nierozdzielanie inicjałów imion od nazwisk autorów pozycji bibliograficznych, np. „B.Kaczer" zamiast „B. Kaczer" w [1] itd.), ewentualnie na odwrót — niepotrzebne umieszczenie spacji (np. „*H* ." zamiast „*H*." na str. 12 lub „*i* -tym" zamiast „*i*-tym" na str. 48);
- niepełna zgodność opisu rysunku 3.3. z faktycznie zamieszczonym w tekście pracy (np. „*Ps*" na str. VIII w przeciwieństwie do poprawnego edycyjnie i występującego w tytule na str. 32 „P_s");
- nadużywanie słowa „pomiędzy" o semantycznym odcieniu dotyczącym raczej kontekstu fizycznego w znaczeniu bardziej abstrakcyjnego „między" (np. we fragmencie „silny związek pomiędzy pozornie niezależnymi zagadnieniami" na str. 1 czy „zminimalizować pobór mocy poprzez odpowiednie wykorzystanie" na str. 37);
- konsekwentna rezygnacja z użycia kursywy, która mogłaby wyróżniać słowa pisane po angielsku oraz z kursywy matematycznej w przypadku rysunków (np. na rys. 4.13 w odniesieniu do „*P* danych");
- opisywanie rysunku zawsze od wielkiej litery (np. „Na Rys. 1.1" zamiast „Na rys. 1.1." na str. 2), mimo że zasady językowe nie dopuszczają w zasadzie w języku polskim wielkiej litery w środku zdania (poza imionami własnymi, skrótowcami itp.);
- konsekwentna rezygnacja z kompaktowania cytowań kolejnych pozycji literatury, co niepotrzebnie wydłuża i zaciemnia tekst (np. „[35][36][37][38][39]" zamiast „[35]-[39]" na str. 4);
- prosty błąd polegający na zgubieniu zmiennej związanej z czasem *t* we wzorze (2.2);
- konsekwentne stosowanie angielskich cudzysłowów ("") zamiast polskich („");
- bardzo rzadkie niedopatrzenia interpunkcyjne (np. brak przecinka po „bądź odwrotnie" na str. 32);
- prawie niewystępujące pominięcie słowa (np. brak „według" w „jak standardu" na str. 61);
- sporadyczne literówki czy błędy gramatyczne, efekt ewidentnych przeoczeń (np. „fragmenty wykresy czasowych" na str. 49).

8. **Słabe strony rozprawy, jej główne wady. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?**

Rozprawa **nie ma istotnie słabych stron**, co nie znaczy że nie można byłoby jej poprawić. Dotyczy to następujących aspektów, o których już wspomniano wcześniej:

- Brak wyróżnienia (najlepiej w postaci odrębnego rozdziału) analizy literaturowej, wraz z wyszczególnieniem prac, które wcześniej skupiały się na aspektach minimalizacji użycia energii w zakresie projektowania układów elektronicznych służących dekodowaniu, jak również z wyraźnym podkreśleniem wniosków płynących z tej analizy.
- Fakt nieobjęcia badaniami eksperymentalnymi kodów proponowanych do użycia w ramach systemów 5G. Są to kody, w przypadku których wybrane parametry są po prostu inne (niekiedy większe niż używane przez Doktoranta). W ogóle ta kwestia dotyczy dostosowania badań do najnowszych zainteresowań naukowej i przemysłowej teleinformatyki. Wada dotyczy również braku skupienia się na najnowocześniejszych systemach transmisyjnych, co powoduje przyjęcie dosyć prostych i przez to nie w pełni realistycznych: modelu kanału AWGN (z addytywnym białym szumem Gaussa — odejście od tego założenia dałoby szansę na uwzględnienie bardzo kłopotliwych błędów paczkowych) oraz modulacji opartej na binarnym kluczowaniu fazy BPSK. Wprawdzie Doktorant podchodzi do tej kwestii refleksyjnie, gdyż np. użycie BPSK uzasadnia powołując się nawet na wiarygodne źródło, ale faktem jest, że zdarzają się prace stosujące także bliższe praktyce założenia (np. modulacje kwadraturowe).
- Niepełne zadbanie o właściwy i jasny opis opracowania wyników eksperymentalnych z punktu widzenia uwiarygodnienia ich od strony statystycznej. Na przykład w tej chwili z opisu wynika, że Doktorant zajmował się tylko estymacją punktową (zapewne wartości średnie), tymczasem byłaby pożądana estymacja przedziałowa (np. oszacowanie przedziału, w którym mieści się średnia), a w każdym razie byłoby pożądane przedyskutować co najmniej dane nt. odchyłek od średniej uzyskiwane w trakcie badań, liczbę powtórzeń przy danej konfiguracji itd.

Wszystkie te wady nie podważają jednak dużej wartości rozprawy.

9. **Przydatność rozprawy dla nauk technicznych, przemysłu, obronności kraju itp.**

Oceniana rozprawa merytorycznie mieści się na styku co najmniej dwóch dyscyplin w zakresie nauk technicznych:

- **elektroniki** ze względu na badania nad sprzętem oraz energooszczędnością,
- **teleinformatyki** z uwagi na skupieniu się na nowoczesnych kodach korekcyjnych, propozycjach w zakresie szczegółów algorytmów dekodowania, ale też na aspekt programowania FPGA.

Tego rodzaju interdyscyplinarność jest cenna, tym bardziej że niezbyt częsta. Sam obserwuję np. przesadne skupienie prac o charakterze teleinformatycznym tylko na aspekcie abstrakcyjnym, bez uwzględnienia korelatu sprzętowego. W tym

przypadku podejście jest bardzo bogate, dzięki czemu Doktorant uzyskuje wpływ w obu wspomnianych dyscyplinach — przede wszystkim dostarcza innowacyjne rozwiązanie w zakresie koncepcji sterowania układu elektronicznego (tu: FPGA) opracowanego na potrzeby dekodowania kodów LDPC. Rozwiązanie to jest oparte na oryginalnym pomyśle Doktoranta, które nazwał „Token Ring".

Jako celna praca w obszarze wdrożeniowym rozprawa ma również **przydatność przemysłową**. Doktorant opracował pełne rozwiązanie, które z jednej strony obsługuje współcześnie używane kody korekcyjne, a z drugiej strony odpowiada na bardzo ważną potrzebę związaną z oszczędnością energii, która jest istotna z punktu widzenia biznesowego (zwiększanie żywotności miniaturyzowanych urządzeń np. z obszaru Internetu Rzeczy IoT; obniżanie kosztów związanych z opłatami za użycie prądu; wreszcie — przynajmniej pośrednio — zmniejszanie śladu węglowego).

10. Podsumowanie (czy rozprawa spełnia wymagania przez obowiązujące przepisy)

W świetle tego, co napisałem w mojej recenzji powyżej, stwierdzam, że rozprawa stanowi oryginalne i wartościowe rozwiązanie istotnego problemu na styku elektroniki oraz teleinformatyki. Zatem:

Recenzowana praca doktorska **spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim**, zgodnie z Ustawą o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. z 2017 r. poz. 1789), oraz zgodnie z Ustawą z 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1669 z póź. zm.) w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika, wnoszę o przyjęcie rozprawy i jej dopuszczenie do publicznej obrony.