

dr hab. inż. Mieczysław Jessa, prof. ucz.
Politechnika Poznańska
mieczyslaw.jessa@put.poznan.pl

Poznań, 15.07.2024 r.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Biuro Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne

wpłynęło dnia 16.07.2024

nr zał.

Recenzja rozprawy doktorskiej

Jakuba Hyla

zatytułowanej:

Efektywne kodowanie korekcyjne dla systemów transmisji w Internecie rzeczy

Rozprawa doktorska została przygotowana na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej, a jej podstawą jest cykl sześciu artykułów naukowych. Pięć z nich opublikowano w czasopismach, a szósty przesłano do recenzji. Na rozprawę składają się: lista publikacji, streszczenie, poszerzone streszczenie, oba w języku polskim i angielskim, spis literatury obejmujący 143 pozycje, w tym 2 pozycje, w których Doktorant jest współautorem, kopie publikacji, oświadczenia współautorów o udziale w publikacjach oraz Zaświadczenie firmy TKH Technology Poland Sp. z o.o. z dnia 29.08.2023 roku. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Wojciech Sułek, prof. uczelni.

1. Problem badawczy i jego znaczenie

Dynamiczny rozwój Internetu znacząco zwiększył wymagania stawiane urządzeniom realizującym transmisję danych. Podstawowym oczekiwaniem jest maksymalizacja szybkości przesyłania danych przy zachowaniu akceptowalnej stopy błędów i założonym wydatku energetycznym. W przypadku Internetu rzeczy (IoT), czynniki które najbardziej ograniczają projektanta dotyczą zużycia energii oraz bitowej stopy błędów. Szczególnie istotne jest zachowanie akceptowalnej stopy błędów, gdyż w Internecie rzeczy transmitowane dane zazwyczaj podlegają kryptograficznym procedurom uwierzytelniania oraz sprawdzania integralności. Błędy transmisji skutkują negatywną decyzją dotyczącą bezpieczeństwa danych, co wiąże się z powtórzeniem transmisji i weryfikacji, istotnie zwiększając wydatek energetyczny nadajnika. W przypadku braku ochrony kryptograficznej, oczekujemy zachowania stopy błędów przy mniejszej energii przeznaczanej na transmisję pojedynczego bitu. Zastosowanie kodowania korekcyjnego może znacząco poprawić efektywność energetyczną całego systemu, niezależnie od tego czy dane podlegają ochronie kryptograficznej, czy też są jej pozbawione. Końcowy bilans istotnie zależy od zastosowanego algorytmu korekcji, który może mniej lub bardziej obciążać energetycznie źródło zasilania oraz od parametrów energetycznych układu realizującego ten algorytm.

Recenzowana rozprawa podejmuje jedno z istotnych wyzwań praktycznych związanych z wyborem metody kodowania korekcyjnego dla urządzeń Internetu rzeczy oraz platformy sprzętowej, która umożliwia efektywną implementację wybranego algorytmu. Treści przedstawione w rozprawie są rezultatem badań wykonanych przez Autora w ramach doktoratu wdrożeniowego, we współpracy z firmą TKH Technology Poland Sp. z o.o., będącą członkiem grupy TKH, specjalizującej się w konstruowaniu urządzeń szeroko pojętego Internetu rzeczy. Rezultaty pracy zostały wdrożone w jednym z projektów prowadzonych przez TKH Technology Poland Sp. z o.o., a wyniki zamieszczono w publikacjach tworzących spójny tematycznie cykl artykułów.

Podjęty w rozprawie problem efektywnego kodowania korekcyjnego dla systemów transmisji Internetu rzeczy uważam za istotny naukowo i o dużym znaczeniu praktycznym.

2. Wkład autora

Przedstawiona do oceny rozprawa składa się z sześciu artykułów, którym przypisano etykiety od **Publikacja 1** do **Publikacja 6**. Wkład Doktoranta został określony procentowo i merytorycznie w dołączonych oświadczeniach. Dla każdego z artykułów podaję moją ocenę wkładu naukowego i praktyczności zaproponowanego rozwiązania.

Publikacja 1. W. Sułek i J. Hyla, „Aplikacje kodów korekcyjnych LDPC we współczesnych systemach radiokomunikacyjnych”, w Elektronika, telekomunikacja, mobilność, t. 870, J. Izydorczyk, Red. 2020, s. 179-189.

W artykule przedstawiono rezultaty eksperymentalnej, w drodze symulacji, weryfikacji możliwości korekcyjnych kodów LDPC stosowanych w różnych systemach komunikacji bezprzewodowej takich jak WiFi, WiMax, DVB-S2 oraz sieciach 5G. Deklarowany wkład Doktoranta wynosi 40% i dotyczy przeglądu literaturowego oraz przygotowania tekstu artykułu. Chociaż artykuł potwierdza zasadność i praktyczność stosowania kodów LDPC w oszczędnych energetycznie systemach komunikacyjnych, to wkład Doktoranta ma przede wszystkim charakter techniczny.

Publikacja 2. J. Hyla, W. Sułek, W. Izydorczyk, L. Dziechowski, i W. Filipowski, „Efficient LDPC Encoder Design for IoT-Type Devices”, Applied Sciences-Basel, t. 12, Art. nr 5, 2022, doi: 10.3390/appl2052558.

Jest to publikacja o zasięgu międzynarodowym w czasopiśmie ze zdefiniowanym Impact Factor, wynoszącym aktualnie 2,5. W pracy opisano implementację w prostym kontrolerze, a więc w urządzeniu z silnymi ograniczeniami dla kodowania LDPC. Otrzymane rezultaty porównano z innymi kodami blokowymi, tj. RS i BCH, wskazując na znaczące skrócenie czasu kodowania, a więc w konsekwencji także mniejsze zapotrzebowanie energetyczne kodów LDPC w stosunku do innych kodów blokowych, przy porównywalnych wymaganiach co do wielkości pamięci. Wkład Doktoranta (70%) polegał na implementacji algorytmów, opracowaniu wyników oraz przygotowaniu odpowiedzi na uwagi recenzentów. Przegląd literaturowy, deklarowany przez Doktoranta, w zdecydowanej większości opierał się na przeglądzie z **Publikacji 1**. Wkład naukowy oraz praktyczność rezultatów otrzymanych przez Doktoranta uważam za istotne.

Publikacja 3. J. Hyla i W. Sułek, „Dekoder LDPC implementowany w mikrokontrolerze dla systemów Internetu rzeczy”, Przegląd Elektrotechniczny, t. 99, Art. nr 4, 2023, doi: 10.15199/48.2023.04.23.

Publikacja ma charakter uzupełniający w stosunku do Publikacji 2. Opisano model przykładowego rozwiązania komunikacji w IoT (Rys. 1) oraz realizację algorytmu kodowania z Publikacji 2 w mikrokontrolerze STM32K476, należącym do serii o bardzo niskim poborze mocy, który można wykorzystać w IoT. Uwagę skupiono na działaniu dekodera. Przeanalizowano działanie algorytmu dekodowania w zależności od liczby błędnych bitów w odebranym słowie kodowym, analizując zajętość pamięci, czas dekodowania oraz przepustowość dekodera. Wykazano, że możliwa jest implementacja dekodera kodów LDPC oraz QC-LDPC, także nieregularnych, w prostym układzie mikrokontrolera o niskim poborze mocy. Deklarowany udział Doktoranta w tej publikacji wynosi 60% i polegał na przygotowaniu algorytmów dekodowania LDPC, opracowaniu wyników, przygotowaniu manuskryptu oraz

odpowiedzi na uwagi recenzentów. Także w przypadku tego artykułu, wkład Doktoranta uważam za istotny.

Publikacja 4. J. Hyla i W. Sułek, „Energy-efficient Raptor-like LDPC coding scheme design and implementation for IoT communication Systems”, *Energies*, t. 16, Art. nr 12, 2023, doi: 10.3390/en16124697.

Artykuł opublikowano w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym ze zdefiniowanym Impact Factor, wynoszącym aktualnie 3,0. W pracy uwagę skupiono na efektywności energetycznej transmisji danych binarnych na potrzeby IoT. Pokazano, że zastosowanie kodowania typu Raptor Like (RL) opartego o kod bazowy QC-LDPC (kodowanie QC-RL-LDPC), może zwiększyć efektywność energetyczną transmisji w porównaniu do kodowania QC-LDPC o stałej sprawności. W pracy opisano także implementację kodera QC-RL-LDPC w układzie mikrokontrolera. Całość pracy to w istocie całościowy, chociaż niezamknięty opis procedury projektowej oraz implementacyjnej systemu transmisji z kodowaniem QC-RL-LDPC. Wkład Doktoranta (70%) polegał na opracowaniu modelu systemu, implementacji algorytmów kodowania adaptacyjnego, opracowaniu wyników, przygotowaniu manuskryptu oraz na udzieleniu odpowiedzi na uwagi recenzentów. Wkład naukowy oraz praktyczność rezultatów otrzymanych przez Doktoranta uważam za istotne.

Publikacja 5. J. Hyla i W. Sułek, „Niebinarne kodowanie LDPC dla systemów Internetu rzeczy”, *Przegląd Elektrotechniczny*, Art. nr 4, 2024, doi:10.15199/48.2024.03.44.

Artykuł przedstawia rozszerzenie koncepcji kodowania typu Raptor na kodowanie niebinarne. O takiej możliwości wspomniano w podsumowaniu Publikacji 4. Opisano programową implementację kodera NB-LDPC. Otrzymane rezultaty wskazują, że wdrożenie kodów niebinarnych może przynieść znaczące korzyści w przypadku urządzeń IoT zasilanych bateryjnie, tj. bez możliwości uzupełnienia strat energii. Wkład Doktoranta wynosi 70% i dotyczy przeglądu literaturowego, przygotowania algorytmów kodowania niebinarnego LDPC, opracowania wyników, przygotowania manuskryptu oraz odpowiedzi na uwagi recenzentów. Wkład naukowy oraz praktyczność rezultatów przedstawionych przez Doktoranta jest istotny i wpisuje się w nowy kierunek badań – wykorzystanie kodowania niebinarnego w urządzeniach IoT o bardzo małych zasobach energetycznych.

Publikacja 6 w trakcie recenzji (ID: Access-2024-04215). J. Hyla i W. Sułek, „Short Blocklength Nonbinary Raptor-Like LDPC Coding Systems Design and Simulation”, *IEEE Access*.

W pracy zaproponowano procedurę konstruowania krótkich kodów niebinarnych QC-RL-LDPC, dostosowanych do efektywnej energetycznie implementacji kodera o niskiej złożoności. Chociaż zdaniem recenzenta treści zawarte w pracy są interesujące i wartościowe oraz stanowią naturalną kontynuację badań zapoczątkowanych Publikacją 5, to z formalnego punktu widzenia Publikacja 6 nie może być przedmiotem cyklu publikacji w ramach doktoratu, gdyż nie została opublikowana. Zgodnie z artykułem 187, ust. 3, Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”, z późniejszymi zmianami, „Rozprawę doktorską może stanowić praca pisemna, w tym monografia, zbiór **opublikowanych** i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, praca projektowa....”

Przedstawiony cykl publikacji stanowi niewątpliwie cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych. Jest spójny logicznie i merytorycznie. Autor zaproponował rozwiązania, których celem jest zredukowanie poboru energii w trakcie kodowania oraz podczas transmisji w kanale z zakłóceniami w kierunku od urządzenia Internetu rzeczy do odbiornika, zazwyczaj dysponującego znacznie większymi zasobami energii. W pracach nie zaproponowano nowej metody kodowania, lecz dzięki

wnikliwej analizie istniejących metod kodowania, wspartej symulacjami i eksperymentami z rzeczywistymi układami, wybrano takie metody lub dokonano ich połączenia, które zapewniają realizację postawionych celów. Kluczowe osiągnięcia zawarto w Publikacji 2, Publikacji 4, obie w czasopismach z IF, oraz w Publikacji 5.

W mojej ocenie przedłożone prace wskazują na umiejętności kandydata zarówno w zakresie pracy teoretycznej jak i praktycznej, potwierdzonej wdrożeniem efektywnej metody kodowania korekcyjnego w urządzeniach IoT firmy TKH Group (Zaświadczenie firmy TKH Technology Poland Sp. z o.o. z dnia 29.08.2023 roku). Całość stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego jakim jest zachowaniu akceptowalnej stopy błędów, przy silnych ograniczeniach energetycznych nakładanych na urządzenia Internetu rzeczy.

3. Poprawność

Ponieważ przedstawiona rozprawa doktorska ma charakter zbioru opublikowanych artykułów (wyjątek stanowi Publikacja 6), to konieczność oceny poprawności rozprawy stawia recenzenta w niezręcznej sytuacji. Ponowne recenzowanie prac, które już zostały zrecenzowane ma wartość ograniczoną. Stąd oceniając poprawność pracy przede wszystkim skupię się na stronach od 7 do 31 otrzymanego dokumentu, na których Autor zawarł opis swoich dokonań, a które w dalszej części będę nazywał Autoreferatem. Do tej części dokumentacji mam najwięcej zastrzeżeń.

Przedstawiony opis merytoryczny jest relatywnie krótki. Pomijając Podsumowanie, obejmuje 17 stron. Ponieważ temat rozprawy dotyczy efektywnego kodowania korekcyjnego, oczekiwałbym chociażby pobieżnego przeglądu metod kodowania z punktu widzenia ich zalet i wad dla zastosowań w Internecie rzeczy. Autor co prawda na stronie 15 pisze, że „Wykonane prace pokazały jednak, że zastosowanie zaawansowanych metod korekcji, w szczególności kodowania LDPC (ang. *Low-Density Parity-Check*) [87] z dekodowaniem miękko-decyzyjnym, niebinarnego kodowania LDPC [29], kodowania z macierzami quasi-cyklicznymi QC-LDPC [41], jak również kodowania typu Raptor [25], ma uzasadnienie w możliwości uzyskania zwiększonej efektywności energetycznej układu kodera implementowanego w mikrokontrolerze i układu transmisji zabezpieczonej kodami”, jednak treści cytowanych prac nie wspierają wystarczająco tej tezy. Cytowane prace zawierają opisy wymienionych metod kodowania i nie wynika z nich, że są to jedyne rozwiązania, które mogą poprawić efektywność energetyczną zarówno samego procesu kodowania jak i procesu transmisji. Co prawda rzeczywiście kody LDPC są „uznawane za jedną z najlepszych metod korekcji błędów w sensie wydajności korekcji i są wykorzystywane w znaczących standardach radiokomunikacyjnych, takich jak WiF, WiMax, DVB-T2, DVB-S2”, to nie wynika z tego, że za pomocą innych kodów nie można osiągnąć celów postawionych w rozprawie. Jako przykład wymienię pracę S. A. Alabady, M. F. M. Salleh, F. Al-Turjman, „LCPC error correction code for IoT applications,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 42, Oct. 2018, pp. 663-673 (<https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.036>). Autorzy tej pracy twierdzą, że zaproponowane przez nich kody LCPC (ang. *Low Complexity Parity Check*) mają mniejszą złożoność oraz mają mniejsze wymagania co do pamięci w stosunku do kodów LDPC czy Reeda-Solomona.

Kolejna uwaga dotyczy oceny efektywności energetycznej systemów transmisji. W dokumencie nie zdefiniowano miary tej efektywności. Który z wydatków energetycznych – proces kodowania w mikrokontrolerze, czy proces transmisji ma decydujący wpływ na zużycie energii? Jak te proporcje zmieniają się w funkcji odległości od nadajnika, szybkości transmisji i oczekiwanej stopy błędów?

Istnieje niespójność pomiędzy treścią zaświadczenia firmy TKH Technology Poland Sp. z o.o. z dnia 29.08.2023 roku, a informacją zawartą na stronie 31 Autoreferatu. W dołączonym Zaświadczeniu jest mowa, że „Rozwiązanie to, oparte na efektywnym kodowaniu korekcyjnym, zostało skutecznie zaimplementowane jako kluczowy element projektu związanego z technologią Internetu rzeczy”,

natomiast w Autoreferacie jest mowa o częściowym wdrożeniu jako istotny element projektów prowadzonych przez grupę TKH. Poza tym, ani z treści Autoreferatu ani z treści Zaświadczenia nie wynika, co konkretnie było przedmiotem wdrożenia lub częściowego wdrożenia.

Autor nie uniknął także błędów redakcyjnych. Objasnienia niektórych akronimów, np. LDPC, pojawiają się więcej niż jeden raz, podczas gdy powinny być zamieszczone tylko podczas wprowadzania akronimu. W wersji angielskiej pojawia się podpis pod rysunkiem w języku polskim (str. 33), a słowo Rysunek nie jest zamienione na słowo Figure (str. 33, 43, 45).

4. Wiedza kandydata

Wiedzę kandydata oceniam pozytywnie, chociaż ze względu na brak w Autoreferacie szerszego opisu stanu wiedzy w badanym obszarze oraz współautorstwo wszystkich publikacji, jest to zadanie trudne. Pozytywna ocena końcowa wynika z następujących przesłanek:

1. Treści artykułów tworzących cykl publikacji potwierdzają wysokie kompetencje autorów w badanym obszarze.
2. Każdy z artykułów ma adekwatną bibliografię, wskazującą na wiedzę autorów publikacji w zakresie aktualnego stanu wiedzy na temat Internetu rzeczy, kodowania korekcyjnego, algorytmów, języków programowania, sterowników oraz mikrokontrolerów.
3. Przedstawiony Autoreferat zawiera 143 pozycje bibliograficzne, dobrane adekwatnie do poruszanych w nim treści.
4. Udział i zakres czynności wykonanych podczas przygotowania artykułów oraz powierzenie Doktorantowi zadania udzielenia odpowiedzi na uwagi recenzentów również wskazuje na opanowanie wiedzy z zakresu objętego tematem rozprawy doktorskiej.

5. Inne uwagi

Deklarowany w rozprawie sumaryczny wkład Autora w powstanie cyklu publikacji jest znaczący. Po zastosowaniu równoważnika można go ocenić na 3,1 pracy indywidualnej, co w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych i dla przypadku rozpraw doktorskich jest wynikiem zdecydowanie zadowalającym. Istotną zaletą rozprawy jest praktyczność otrzymanych rezultatów, w szczególności implementacja wyników w urządzeniach firmy TKH Group. Pewien niedosyt budzi brak informacji na temat tego, co konkretnie zostało wdrożone w urządzeniach firmy TKH Group oraz brak szerszego przeglądu metod kodowania korekcyjnego możliwych do zastosowania w urządzeniach Internetu rzeczy.

6. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę opinie zaprezentowane w poprzednich punktach i wymagania zdefiniowane przez art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”, z późniejszymi zmianami, moja ocena rozprawy pod względem trzech podstawowych kryteriów jest następująca:

A. Czy rozprawa zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego? (wybierz jedną opcję stawiając znak **X**)

☒	☐	☐	☐	☐
<i>Zdecydowanie TAK</i>	<i>Raczej TAK</i>	<i>Trudno powiedzieć</i>	<i>Raczej NIE</i>	<i>Zdecydowanie NIE</i>

B. Czy po przeczytaniu rozprawy zgadzasz się, że kandydat posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne?

☒	☐	☐	☐	☐
<i>Zdecydowanie TAK</i>	<i>Raczej TAK</i>	<i>Trudno powiedzieć</i>	<i>Raczej NIE</i>	<i>Zdecydowanie NIE</i>

C. Czy kandydat posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej?

☒	☐	☐	☐	☐
<i>Zdecydowanie TAK</i>	<i>Raczej TAK</i>	<i>Trudno powiedzieć</i>	<i>Raczej NIE</i>	<i>Zdecydowanie NIE</i>

Podpis