

wpłynęło dnia 16.07.2024

nr ..... zał. ....

Szczecin, 11.07.2024

dr hab. inż. Jacek Piskorowski, prof. ZUT  
Katedra Inżynierii Systemów, Sygnałów i Elektroniki  
Wydział Elektryczny  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

## RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Hyli pt.: „Efektywne kodowanie korekcyjne dla systemów transmisji w Internecie rzeczy”.

Podstawą formalną opracowania recenzji jest Uchwała nr 28/2024 Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej z dnia 16 kwietnia 2024 roku, a także pismo o sygnaturze RDAEETK.512.2.2024 Przewodniczącej Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej prof. dr hab. inż. Moniki Kwoki z dnia 13 maja 2024 roku. Promotorem opiniowanej rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Wojciech Sułek, prof. PŚ.

### 1. Znaczenie podjętej tematyki

Opiniowana rozprawa doktorska dotyczy problematyki kodowania korekcyjnego dla systemów transmisji w IoT. Rynek IoT w bardzo dynamiczny sposób rozwija się wraz z postępem technologii. Istotny wpływ na rozwój technologii IoT ma coraz większe zainteresowanie rozwiązaniami z tego obszaru oraz rosnąca liczba inteligentnych urządzeń, które wprowadzane są na rynek. Istotnym czynnikiem wpływającym na rozwój systemów IoT jest również miniaturyzacja, która umożliwia umieszczanie modułów w niemal każdym urządzeniu. Do kluczowych elementów architektury IoT należy z pewnością zaliczyć protokoły transmisyjne wraz z algorytmami i systemami kodowania korekcyjnego. Efektywność protokołów transmisyjnych oraz mechanizmów korekcji błędów jest niezwykle

istotna dla zapewnienia niezawodności komunikacji, minimalizacji opóźnień, a także optymalizacji zużycia energii.

Przeprowadzone przez Doktoranta badania dotyczą w szczególności opracowania efektywnych energetycznie algorytmów kodowania i dekodowania LDPC (Low-Density Parity-Check) i ich zastosowania w protokołach komunikacyjnych systemów IoT. Jednym z istotnych wymagań, które zostały uwzględnione podczas tworzenia algorytmów było uwzględnienie ograniczonych zasobów obliczeniowych i pamięciowych sprzętu systemów IoT. Przeprowadzone zostały również z sukcesem badania nad wykorzystaniem adaptacyjnych mechanizmów kodowania dla kodów QC-LDPC, a także zastosowaniem kodów niebinarnych (NB). Podjęta przez Doktoranta tematyka wpisuje się wprost w zakres dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Należy również podkreślić, że tematyka rozprawy doktorskiej jest niezwykle ważna i aktualna zarówno z teoretycznego, jak i praktycznego punktu widzenia. Walory praktyczne zostały podkreślone przede wszystkim wdrożeniem wyników przeprowadzonych badań w przedsiębiorstwie TKH Technology Poland Sp. z o.o.

## **2. Ogólna charakterystyka, zakres i cel rozprawy**

Rozprawa doktorska jest efektem badań przeprowadzonych w ramach doktoratu wdrożeniowego we współpracy z przedsiębiorstwem TKH Technology Poland Sp. z o.o., którego działalność dotyczy projektowania i konstrukcji urządzeń i systemów IoT. Wyniki przeprowadzonych badań zostały wdrożone w ramach jednego z projektów realizowanego przez przedsiębiorstwo TKH Technology Poland Sp. z o.o. Problematyka badawcza rozprawy doktorskiej dotyczy warstwy transmisyjnej systemów IoT, a konkretnie kodowania korekcyjnego w łączy komunikacyjnym. Doktorant podkreśla, że znacząco ograniczone zasoby obliczeniowe i pamięciowe urządzeń końcowych sieci IoT sugerują wykorzystanie metod korekcji o stosunkowo niewielkim stopniu złożoności. Jednocześnie Doktorant podkreśla, że przeprowadzone badania wykazały, że wykorzystanie bardziej złożonych metod korekcji, a w szczególności kodowania LDPC z dekodowaniem miękko-decyzyjnym, niebinarnego kodowania LDPC, kodowania QC-LDPC, a także kodowania typu Raptor jest uzasadnione w kontekście zwiększenia efektywności energetycznej kodera zaimplementowanego w mikrokontrolerze oraz całego układu transmisji. Efektywność energetyczna jest szczególnie istotna w przypadku urządzeń wykorzystujących zasilanie

baterijne. Przeprowadzone przez Doktoranta prace badawcze oraz wdrożeniowe polegały przede wszystkim na opracowaniu oraz implementacji efektywnych energetycznie algorytmów korekcji danych w środowisku zakłóconego kanału komunikacyjnego dla urządzeń typu IoT. Doktorant wykorzystał, jak już wcześniej wspomniano, binarne i niebinarne metody kodowania i dekodowania LDPC, a także adaptacyjne mechanizmy kodowania typu Raptor. Zasadniczym kryterium wyboru metod kodowania i dekodowania była zdolność do efektywnej redukcji błędów transmisji danych przy zachowaniu relatywnie niskiego zużycia zasobów obliczeniowych. W efekcie do głównych celów rozprawy doktorskiej Doktorant zaliczył:

- obniżenie poboru energii w systemach wbudowanych urządzeń typu IoT wykorzystujących niestandardowe protokoły komunikacji w zakłóconych łączach bezprzewodowych lub przewodowych, poprzez zastosowanie nowoczesnych kodów dekodowanych iteracyjnie: binarnych QC-LDPC, niebinarnych QC-LDPC do zabezpieczenia transmisji, zamiast klasycznych kodów blokowych;
- zapewnienie skutecznej i efektywnej energetycznie korekcji błędów transmisji w sieciach IoT, wykorzystujących niestandardowe protokoły komunikacji i zróżnicowane media komunikacyjne, w szczególności w łączności pomiędzy węzłami o niesymetrycznym charakterze: od węzłów końcowych dysponujących stosunkowo niewielkimi zasobami obliczeniowymi, do bramek, o znacznie większych zasobach obliczeniowych i energetycznych.

Tak postawione wyzwania doprowadziły do sformułowania następującej tezy rozprawy doktorskiej:

*„W przypadku implementacji koderów LDPC w systemach mikroprocesorowych można wskazać konstrukcję koderów oraz klasę kodów skutkującą uzyskaniem szczególnie efektywnych energetycznie systemów transmisji danych. Implementacje te należą do najefektywniejszych w całej klasie kodów blokowych, a ich efektywność można dalej zwiększać przez zastosowanie techniki kodowania typu Raptor”.*

Cele rozprawy doktorskiej zostały osiągnięte poprzez opracowanie programowych modeli układów kodowania i dekodowania LDPC i NB-LDPC, implementację koderów kodów w CPU typowych współczesnych mikrokontrolerów, stworzenie eksperymentalnych macierzy kontrolnych podklasy kodów efektywnie kodowanych o różnych rozmiarach

bloków i sprawnościach, opracowanie i eksperymentalną weryfikacją systemu kodowania dla łącz o nieznanym i zmiennym w czasie parametrach, określenie możliwości uzyskania dodatkowej oszczędności energii w układzie nadawczym systemu dla łącz o nieznanym i zmiennym w czasie parametrach, opracowanie metody tworzenia kodów niebinarnych o krótkich blokach, implementacją kodera kodów niebinarnych w układzie mikrokontrolera, a także przeprowadzenie szeregu badań eksperymentalnych.

Cele oraz tezę pracy zdefiniowano w precyzyjny sposób. Można stwierdzić, że postawione cele pracy są istotne i aktualne na tle obecnego stanu wiedzy w zakresie kodowania korekcyjnego dla systemów transmisji w systemach IoT. Cele oraz teza pracy odpowiadają zakresowi i tematyce rozprawy oraz determinują zakres przeprowadzonych badań. Uważam, że podjęcie tematu rozprawy doktorskiej było celowe zarówno ze względów poznawczych, teoretycznych oraz praktycznych. Teza pracy została prawidłowo postawiona, natomiast cele główne rozprawy doktorskiej zostały zrealizowane.

### **3. Struktura rozprawy doktorskiej**

Rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Hyli pt.: „Efektywne kodowanie korekcyjne dla systemów transmisji w Internecie rzeczy” ma formę tematycznie powiązanego cyklu artykułów naukowych. Pięć artykułów zostało już opublikowanych. Szósty artykuł jest zgodnie z deklaracją Doktoranta w trakcie recenzji. Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska obejmuje treści wszystkich artykułów naukowych. Ponadto, w rozprawie doktorskiej zamieszczono streszczenie, poszerzone streszczenie (obejmujące wprowadzenie, wykaz istotnych pojęć, tezę badawczą, cel oraz zakres pracy, syntetyczny opis przeprowadzonych prac badawczych oraz uzyskanych wyników, a także podsumowanie), spis literatury, a także załączniki obejmujące oświadczenia autorów publikacji o wkładzie procentowym, a także zaświadczenie opiekuna z przemysłu o wdrożeniu rozwiązania IoT.

W pracy oznaczonej nr 1: *W. Sulek i J. Hyla (40% udziału)*, „Aplikacje kodów korekcyjnych LDPC we współczesnych systemach radiokomunikacyjnych”, w *Elektronika, telekomunikacja, mobilność*, t. 870, J. Izydorzyc, Red. 2020, s. 179-189. przedstawiono przegląd cech charakterystycznych podklas kodów LDPC mających zastosowanie w istotnych współcześnie standardach radiokomunikacyjnych, takich jak WiFi, WiMAX, DVB-S2 oraz 5G. Przedstawiono ponadto wyniki badań symulacyjnych rozpatrywanych systemów transmisji, które umożliwiły porównanie poszczególnych aplikacji kodów. W pracy

zamieszczono również wyniki potwierdzające możliwości korekcyjne, które zostały uzyskane poprzez wykorzystanie autorskiego środowiska symulacji systemów transmisji.

W pracy oznaczonej nr 2: *J. Hyla (70% udziału), W. Sulek, W. Izydorczyk, L. Dzikowski, i W. Filipkowski, „Efficient LDPC Encoder Design for IoT-Type Devices”, Applied Sciences-Basel, t. 12, Art. nr 5, 2022, doi: 10.3390/app12052558.* przedstawiono rozwiązanie efektywnej implementacji binarnego kodera QC-LDPC w mikrokontrolerze oraz przedstawiono eksperymentalne wyniki badań potwierdzające istotne ograniczenie jednostkowego zużycia energii opracowanego rozwiązania względem kodera RS, BCH oraz LDPC bez wektoryzacji obliczeń. Przeprowadzone badania wykazały znaczący wzrost efektywności w zakresie zużycia pamięci i czasu kodowania w porównaniu z algorytmami kodowania wykorzystującymi bezpośrednią reprezentację macierzy parzystości. Przeprowadzono ponadto analizę złożoności obliczeniowej kodera, a także analizę problemu związanego z przetwarzaniem dużej liczby danych przez urządzenia o ograniczonych możliwościach obliczeniowych.

W pracy oznaczonej nr 3: *J. Hyla (60% udziału) i W. Sulek, „Dekoder LDPC implementowany w mikrokontrolerze dla systemów Internetu rzeczy”, Przegląd Elektrotechniczny, t. 99, Art. nr 4, 2023, doi: 10.15199/48.2023.04.23.* zaprezentowano wyniki implementacji algorytmów kodowania korekcyjnego LDPC w układzie mikrokontrolera, które mogą być wykorzystane w protokołach komunikacyjnych przetwarzających niewielką ilość danych przy ograniczonych zasobach obliczeniowych. Z przeprowadzonych eksperymentów wynika, że kody nieregularne mogą mieć lepsze właściwości korekcyjne. Potwierdzono możliwość implementacji dekodera nieregularnych kodów LDPC oraz QC-LDPC w układzie mikrokontrolera pomimo znaczących wymagań odnośnie mocy obliczeniowej dla kodów LDPC. Zaproponowano ponadto przybliżoną formułę, która umożliwia obliczenie przepustowości dekodera zaimplementowanego w typowym mikrokontrolerze.

W pracy oznaczonej nr 4: *J. Hyla (70% udziału) i W. Sulek, „Energy-efficient Raptor-like LDPC coding scheme design and implementation for IoT communication system”, Energies, t. 16, Art. nr 12, 2023, doi: 10.3390/en16124697.* przedstawiono oryginalne rozwiązanie efektywnej implementacji kodera w systemie redundancji przyrostowej QC-RL-LDPC. Ponadto, przedstawiono oryginalny algorytm dekodowania kodów QC-RL-LDPC oraz środowisko symulacji kodowania RL, Przedstawiono również wyniki eksperymentalne

potwierdzające możliwość uzyskania obniżonego jednostkowego zużycia energii w porównaniu z kodowaniem bez adaptacji sprawności, a także możliwość transmisji przy skrajnie niskich poziomach stosunku mocy sygnału do mocy szumu systemu.

W pracy oznaczonej nr 5: *J. Hyla (70% udziału), W. Sulek, „Niebinarne kodowanie LDPC dla systemów Internetu rzeczy”, Przegląd Elektrotechniczny, Art. nr 4, 2024, doi: 10.15199/48.2024.03.44.* przedstawiono uogólnienie metody kodowania na niebinarne kody LDPC nad ciałami  $GF(2^2) \dots GF(2^8)$ , a także wykazano że niebinarny koder LDPC może być efektywnie zaimplementowany w układzie mikrokontrolera. Zaprezentowano potencjał kodów niebinarnych, które po stronie kodera mogą mieć korzystniejsze parametry czasowe niż kody binarne, jednocześnie zapewniając lepsze możliwości korekcyjne.

W pracy oznaczonej nr 6: *w trakcie recenzji (ID:Access-2024-04214). J. Hyla, W. Sulek, „Short Blocklength Nonbinary Raptor-Like LDPC coding Systems Design and Simulation”, IEEE Access.* przedstawiono oryginalną metodę konstrukcji niebinarnych kodów QC-RL-LDPC dostosowanych do efektywnej implementacji kodera. Uogólniono ponadto algorytm dekodowania przyrostowego na kody niebinarne oraz wykazano w jaki sposób niebinarne kody mogą być skutecznie łączone z modulacjami QAM o zmiennym rzędzie. Przedstawiono również wyniki potwierdzające zwiększoną efektywność korekcji w porównaniu z binarnym kodowaniem LDPC standardu 5G, dające potencjalnie możliwość obniżenia energii transmitowanych sygnałów.

#### **4. Ogólna ocena rozprawy**

Autor rozprawy doktorskiej zrealizował postawione cele w sposób adekwatny, używając do tego właściwej metodyki badań. Przyjęte założenia są uzasadnione. W sposób przejrzysty odniesiono się do źródeł. Cele rozprawy doktorskiej zostały osiągnięte poprzez opracowanie, implementację i weryfikację efektywnych metod kodowania korekcyjnego dla systemów transmisji w IoT. Potwierdzone przez Doktoranta zwiększenie wydajności transmisji danych w systemach IoT jest bardzo istotne i ma realny potencjał do poprawy jakości usług, optymalizacji kosztów, a także zwiększenia niezawodności systemów IoT. Do najistotniejszych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć przede wszystkim:



- przeprowadzenie efektywnej implementacji binarnego kodera QC-LDPC w mikrokontrolerze oraz wykazanie znaczącego ograniczenia jednostkowego zużycia energii opracowanego rozwiązania w porównaniu do innych koderów;
- opracowanie i przeprowadzenie efektywnej implementacji kodera QC-RL-LDPC w schemacie redundancji przyrostowej;
- opracowanie algorytmu dekodowania kodów QC-RL-LDPC;
- uogólnienie metody kodowania na niebinarne kody LDPC;
- opracowanie algorytmicznej metody konstrukcji niebinarnych kodów QC-RL-LDPC dostosowanych do efektywnej implementacji kodera.

## 5. Pytania i uwagi krytyczne

- Proszę wyjaśnić jakie konkretnie rozwiązania przedstawione w rozprawie doktorskiej zostały wdrożone w przedsiębiorstwie TKH Technology Poland Sp. z o.o. Proszę przedstawić efekty tych wdrożeń (jeśli to możliwe).
- Proszę wyjaśnić, czy artykuł „*Short Blocklength Nonbinary Raptor-Like LDPC coding Systems Design and Simulation*” zgłoszony do publikacji w *IEEE Access* został przyjęty do druku. Jeśli nie, to proszę przedstawić dalsze losy tego artykułu.
- Doktorant zadeklarował, że zasadniczym kryterium wyboru metod kodowania i dekodowania była zdolność do efektywnej redukcji błędów transmisji danych przy zachowaniu relatywnie niskiego zużycia zasobów obliczeniowych. Czy w takim bądź razie sformułowano jakieś konkretne kryterium optymalizacyjne w tym zakresie?
- Jaki był wpływ zmiennych w czasie parametrów łącz na systemy kodowania?
- Jaki był wpływ nieznanymi parametrów łącz na systemy kodowania?
- Jak został rozwiązany problem zwiększonej złożoności obliczeniowej dekodera w systemach niebinarnego kodowania LDPC?

Wskazane pytania i komentarze mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na ogólnie pozytywną ocenę wyników zawartych w opiniowanej rozprawie doktorskiej.

## 6. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że mgr inż. Jakub Hyla wykazał się dużą wiedzą z zakresu systemów komunikacyjnych, systemów IoT oraz metod kodowania. Rozprawa doktorska mgra inż. Jakuba Hyli pt.: „Efektywne kodowanie korekcyjne dla systemów transmisji w Internecie rzeczy” jest oryginalnym, interesująco przedstawionym, uzasadnionym i twórczym wkładem w dyscyplinę Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Niniejsza rozprawa doktorska zawiera poprawnie sformułowany i rozwiązany problem badawczy oraz posiada bardzo duży aspekt praktyczny. Stanowi zatem oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

W efekcie stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Jakuba Hyli spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, które zostały określone w artykule 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2018 poz. 1668 z późn. zm.). W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgra inż. Jakuba Hyli do publicznej obrony rozprawy doktorskiej przed Radą Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej.

J. P. —