

Łódź, dnia 29.01.2026

dr hab. inż. Piotr Lipiński
Politechnika Łódzka
Instytut Informatyki
Wydział Fizyki Technicznej Informatyki i Matematyki Stosowanej
ul. Wólczańska 215
93-005 Łódź
e-mail: piotr.lipinski@p.lodz.pl

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA:
INSTYTUTU INFORMATYKI TEORETYCZNEJ I STOSOWANEJ POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

Tytuł rozprawy:

**Ograniczenie zużycia energii w rozległych sieciach bezprzewodowych niskiej
mocy przez zarządzanie sposobem transmisji i nasłuchu**

Autor rozprawy: mgr inż. Zbigniew Łaskarzewski
Promotor: dr hab. inż. Krzysztof Grochla, prof. IITiS PAN

1. Wstęp

Niniejsza recenzja została sporządzona na wniosek Rady Naukowej Instytutu Informatyki Teoretycznej i Stosowanej Polskiej Akademii Nauk (IITiS PAN), która działając na podstawie Regulaminu prowadzenia postępowań w sprawie nadania stopnia doktora w IITiS PAN wprowadzonego Uchwałą RN/13/2023 z dnia 11 maja 2023 r. oraz w związku z art. 190 ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2024 poz. 1571), powołała mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Zbigniewa Łaskarzewskiego pt. „Ograniczenie zużycia energii w rozległych sieciach bezprzewodowych niskiej mocy przez zarządzanie sposobem transmisji i nasłuchu”.

2. Przedmiot i zakres rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy zagadnień związanych ograniczeniem zużycia energii w procesie komunikacji w rozległych sieciach bezprzewodowych, ze szczególnym uwzględnieniem bezprzewodowych urządzeń z zasilaniem autonomicznym wykorzystywanych w bezprzewodowych sieciach sensorowych (ang. Wireless Sensor Networks, WSN). Rozwiązania tego typu znajdują coraz szersze zastosowania, jednak jednym z czynników hamujących ich rozwój są ograniczenia związane z relatywnie zbyt krótkim czasem ich pracy. W większości przypadków tego typu urządzenia są zasilane przez baterie lub akumulatory, których pojemność ogranicza czas działania sieci sensorów do kilkudziesięciu miesięcy, podczas gdy w wielu zastosowaniach oczekiwany czas ich działania jest znacznie dłuższy. Poprawę w tym zakresie można uzyskać poprzez zwiększenie pojemności magazynów energii lub redukcję ilości energii zużywanej przez urządzenia WSN. Autor

w swojej rozprawie skoncentrował się na drugim w wymienionych aspektów, ze szczególnym uwzględnieniem kwestii zarządzania procesami transmisji i nasłuchu. W ramach przeprowadzonych badań zaproponował nowe, bardziej efektywne algorytmy pozwalające na minimalizację czasu aktywności radiowej urządzeń, co bezpośrednio przekłada się na redukcję zużycia energii, a tym samym pozwala na wydłużenie czasu ich działania.

3. Układ, struktura rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Zbigniewa Łaskarzewskiego pt. „Ograniczenie zużycia energii w rozległych sieciach bezprzewodowych niskiej mocy przez zarządzanie sposobem transmisji i nasłuchu” zawiera 137 stron, w tym 118 stron tekstu, spis treści, bibliografię, spis rysunków oraz spis tabel. Tekst rozprawy zawiera sześć rozdziałów. W rozdziale pierwszym Autor przedstawił motywację dla prowadzonych przez siebie badań, cel oraz tezę rozprawy jak również metodologię badawczą. W rozdziale drugim dokonał przeglądu stanu wiedzy w zakresie aspektów fizycznych propagacji fal radiowych, konstrukcji urządzeń WSN oraz energooszczędnych protokołów komunikacyjnych. W rozdziale trzecim przeprowadził analizę propagacji sygnału radiowego, którą częściowo oparł na własnych badaniach eksperymentalnych i symulacyjnych. W rozdziale czwartym przedstawił autorski protokół BX-MAC wraz z analizą w zakresie jego efektywności energetycznej. W rozdziale piątym przedstawił wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych w rzeczywistych układach pomiarowych. W ostatnim rozdziale Autor podsumował uzyskane rezultaty oraz wskazał kierunki dalszych badań.

4. Analiza źródeł i stanu wiedzy.

Analiza źródeł i stanu wiedzy dotyczącego zakresu rozprawy została przeprowadzona w rozdziałach pierwszym, drugim i częściowo trzecim. W rozdziale pierwszym Autor skoncentrował się na kontekście i motywacji do prowadzonych badań. W rozdziale drugim Autor omówił zagadnienia związane z podstawami fizycznymi transmisji bezprzewodowej, modelami propagacji fal, konstrukcją urządzeń WSN oraz technikach energooszczędnego nasłuchu. Analiza źródeł dotyczących zakresu rozprawy pozwala stwierdzić, że przegląd literatury jest obszerny, zawiera bowiem 138 pozycji, i aktualny, ponieważ znaczna część z tych pozycji została opublikowana na przestrzeni ostatnich 5 lat, przy czym cztery zostały opublikowane w roku złożenia pracy, a kolejnych sześć w roku poprzedzającym. Znaczną część literatury stanowi różnego rodzaju dokumentacja, co z jednej strony jest zrozumiałe ze względu na tematykę pracy, z drugiej głębsza analiza w aspekcie naukowym podniosłaby wartość naukową pracy. Pomimo tego faktu, w ocenie recenzenta przeprowadzona przez Autora analiza stanu wiedzy jest wystarczająca i dobrze odpowiada zakresowi pracy.

Podsumowując, należy uznać, że Autor przeprowadził analizę stanu wiedzy w sposób prawidłowy, co potwierdza dostateczną wiedzę Autora i znajomość literatury w dyscyplinie naukowej, której dotyczy praca.

5. Wartość naukowa rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Zbigniewa Łaskarzewskiego dotyczy zagadnień związanych z transmisją bezprzewodową przy użyciu fal elektromagnetycznych w warunkach rzeczywistych.

Wynikiem przeprowadzonych badań jest autorski protokół BX-MAX przeznaczony dla urządzeń WSN, który pozwala na redukcję zużycia energii przez urządzenia zasilane ze źródeł o ograniczonej pojemności. Należy podkreślić, że bardzo wiele urządzeń WSN z takich właśnie źródeł korzysta. Rozważane przez Autora zagadnienie ma charakter uniwersalny. Niezależnie bowiem od zastosowanej technologii radiowej, czy też wykorzystywanego źródła energii, kwestia odpowiedniego doboru algorytmów transmisji nadal pozostanie aktualnym zagadnieniem i prowadzenie badań w tym zakresie jest niezmiennie istotne z praktycznego punktu widzenia. Uwzględniając przytoczone powyżej fakty, należy uznać, że **tematyka rozprawy jest aktualna i bardzo istotna**.

W procesie opracowywania nowego protokołu Autor nie ograniczył się jedynie do zaproponowania nowych algorytmów. Przeprowadzone przez niego badania mają solidne podstawy i uzasadnienie zarówno teoretyczne jak i wynikające z obserwacji rzeczywistych sieci bezprzewodowych. Autor dokonał bardzo szczegółowej analizy różnych modeli propagacyjnych, które w przypadku warunków rzeczywistych mają bardzo istotny wpływ na efektywność działania algorytmów transmisji.

Zaproponowany przez Autora protokół BX-MAX stanowi rozwinięcie dwóch protokołów: B-MAC oraz X-MAC. Pierwszy z protokołów cechuje się dużą prostotą. Nadajnik, chcąc wysłać dane, poprzedza je długą, ciągłą preambułą, której czas trwania odpowiada interwałowi próbkowania odbiornika (check interval, CI). Odbiornik wybudza się okresowo, wykonuje ocenę zajętości kanału (CCA) i jeśli wykryje preambułę, pozostaje aktywny do jej zakończenia, a następnie odbiera ramkę danych. Co ważne, protokół ten nie wymaga synchronizacji czasu pomiędzy węzłami. Wadą takiego rozwiązania jest duże zużycie energii, ponieważ odbiornik musi nasłuchiwać średnio przez połowę czasu trwania długiej preambuły. Powoduje to również zjawisko niechcianego nasłuchu (overhearing) we wszystkich węzłach w zasięgu, które nie są adresatami ramki. Protokół X-MAC został zaprojektowany w celu wyeliminowania głównych wad B-MAC poprzez skrócenie czasu nasłuchu preambuły. Zamiast jednej ciągłej preambuły, nadajnik wysyła serię krótkich ramek wybudzających (ang. strobed preamble), z których każda zawiera adres odbiorcy. Pomiędzy tymi ramkami nadajnik robi krótkie przerwy na nasłuch potwierdzenia (ACK). Gdy adresowany odbiorca wybudzi się i odbierze ramkę ze swoim adresem, natychmiast wysyła ACK, co przerywa proces nadawania preambuły i pozwala na natychmiastowe przesłanie danych. Protokół ten wprowadza narzut w postaci nagłówek ramek wybudzających i wymaga wymiany trzech komunikatów (wybudzenie -> ACK -> dane). Dzięki temu, że protokół nie musi czekać na koniec długiej preambuły możliwe jest znaczne ograniczenie zużycia energii przez odbiorcę oraz redukcja overhearing ponieważ niezaadresowane węzły wracają do uśpienia po odebraniu adresu. W rezultacie średni czas nadawania preambuły jest o połowę krótszy niż w B-MAC. Zaproponowany przez Autora protokół BX-MAX stanowi rozwinięcie idei X-MAC, ze szczególnym uwzględnieniem efektywności komunikacji rozgłoszeniowej (broadcast) i multimijsyjnej. Podobnie jak X-MAC, wykorzystuje dzieloną preambułę, ale wprowadza dodatkowe mechanizmy optymalizacji czasu:

- RESP_DELAY: W ramce wybudzającej nadawca wskazuje dokładny czas, w którym oczekuje odpowiedzi. Dzięki temu nadajnik nie musi nasłuchiwać potwierdzenia przez cały czas przerwy między preambułami, lecz wybudza się tylko we wskazanym momencie, co oszczędza energię nadawcy.
- LISTEN_DELAY (dla transmisji rozgłoszeniowej): Ramki wybudzające wskazują przyszły, wspólny moment nasłuchu dla wszystkich urządzeń. Wszystkie wybudzone węzły czekają

na ten sam moment, aby odebrać jedną wspólną ramkę danych, co jest znacznie efektywniejsze w systemach takich jak zdalny odczyt liczników.

- Okres rywalizacyjny: Wprowadza parametry sterujące szczelinowym algorytmem ALOHA dla odpowiedzi od wielu urządzeń (np. przy wykrywaniu sąsiadów).

BX-MAC rozwiązuje problem "bezczynnego nasłuchu" nadawcy (czekającego na ACK w X-MAC) oraz optymalizuje jednoczesne wybudzanie wielu urządzeń do odbioru tych samych danych, co czyni go najbardziej zaawansowanym spośród wymienionych w kontekście nowoczesnych sieci WSN.

Zaproponowany przez Autora protokół BX-MAC został zaimplementowany jako rozszerzenie standardu wM-Bus w postaci warstwy pośredniej, która pozwala na dwukierunkową komunikację z urządzeniami, które standardowo pracują w trybach energooszczędnych (np. tryb S, T lub C w standardzie wM-Bus). Protokół ten został wykorzystany do optymalizacji komunikacji grupowej (Broadcast/Multicast) poprzez wprowadzenie unikalnych cech BX-MAC, takich jak parametry LISTEN_DELAY i RESP_DELAY, które pozwalają na jednoczesne zarządzanie wieloma licznikami i uniknięcie kolizji przy przesyłaniu danych zwrotnych do koncentratora. Dodatkowo w swojej implementacji wM-Bus Autor zaproponował technikę dzielonej preambuły, aby umożliwić wybudzanie urządzeń końcowych tylko wtedy, gdy jest to konieczne, co pozwoliło znacząco zredukować zużycie energii przez urządzenia typowe dla infrastruktury WSN.

W ocenie recenzenta zaproponowane modyfikacje znanych protokołów transmisyjnych mają uzasadnienie teoretyczne i są nowatorskie. Wynikająca z przedstawionych koncepcji teza w brzmieniu: *„Transmisja danych wykorzystująca nasłuch próbkowany oraz ramki wybudzające pozwala na istotne ograniczenie zużycia energii węzłów rozległych sieci bezprzewodowych i zapewnienie wieloletniego czasu ich działania.”* jest w swojej ogólnej koncepcji trafnie sformułowana, ale wydaje się być niepotrzebnie ograniczona, a przez to nie do końca spójna (uwagi w tym zakresie zostały zawarte w sekcji 6).

W ocenie recenzenta praca przedstawiona do oceny właściwie analizuje omawiane zagadnienie. Autor rozwiązał postawione przed nim problemy naukowe, które pojawiły się podczas realizacji praktycznych zadań. Uzyskane podczas prowadzonych badań wyniki były publikowane na szeregu konferencji oraz w uznanych czasopismach, co świadczy o innowacyjności zastosowanych rozwiązań. Praca zawiera więc wszystkie elementy, od praktycznego projektu i wynikającego z niego problemu badawczego, poprzez odpowiedni dobór rozwiązań, po oryginalne wyniki, pokazujące wyższość zastosowanych rozwiązań nad wynikami uzyskiwanymi przy użyciu innych, znanych metod.

Podsumowując analizę osiągnięć doktoranta można stwierdzić, że wszystkie zaproponowane przez Autora modyfikacje znanych algorytmów transmisji przedstawione w rozdziałach trzecim i czwartym jako autorskie, dalej poparte wynikami praktycznymi opisanymi w rozdziale piątym zawierają elementy nowości. **Należy zatem uznać, że uwzględniając stan wiedzy i techniki reprezentowanych przez literaturę światową, tematyka rozprawy jest aktualna, rozprawa jest oryginalna i stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Autora, co potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez jej Autora.** W kontekście wyżej przedstawionych faktów należy również stwierdzić, że **teza rozprawy została sformułowana w sposób intuicyjnie zrozumiały i zweryfikowana w sposób prawidłowy.**

Niewątpliwie bardzo wartościową część pracy stanowią eksperymenty przeprowadzone przy użyciu rzeczywistych układów pomiarowych. Uzyskane wyniki potwierdzają słuszność zaproponowanych koncepcji i bez wątpienia stanowią innowacyjny wkład w rozwój dyscypliny naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja.

6. Uwagi krytyczne i pytania

Niezależnie od ogólnie pozytywnej oceny merytorycznej pracy, niektóre jej fragmenty wzbudzają pewne wątpliwości wymagające szerszego omówienia:

Uwagi ogólne

1. W ocenie recenzenta teza pracy została sformułowana w sposób nie do końca spójny. Zaproponowane przez Autora metody są, co do zasady, ogólne i mogą znaleźć zastosowanie w różnych systemach, co w ocenie recenzenta stanowi istotną wartość pracy. Z tego powodu nie do końca zrozumiały jest fragment tezy mówiący o wieloletnim działaniu: „(...) i zapewnienie wieloletniego czasu ich działania”. To przez jaki czas systemy będą działać zależy od wielu czynników, takich jak chociażby pojemność źródła zasilania, ilość przesyłanych danych itp.. Tak sformułowana teza wymagałaby dodatkowych założeń, których określone zostałyby szczegółowe warunki, dla których jest spełniona, nie może ona bowiem być spełniona w przypadku ogólnym. Jednocześnie, jak Autor wykazał teoretycznie w dalszej części pracy, zaproponowane przez niego algorytmy pozwalają na redukcję zużycia energii w przypadku ogólnym. W związku z powyższym niecelowe wydaje się ograniczanie tezy poprzez określenie konkretnych czasów działania układu.
2. Zaproponowany przez Autora układ pracy niedostatecznie uwypukla zależności pomiędzy badaniami opisanymi w poszczególnych rozdziałach. Czytając pracę po raz pierwszy recenzent odniósł wrażenie, że zawiera ona trzy niepowiązane ze sobą elementy: symulację propagacji sygnału radiowego (rozdział 3), projekt protokołu BX-MAC (rozdział 4) oraz weryfikację praktyczną (rozdział 5). Zrozumienie zależności pomiędzy poszczególnymi elementami pracy wymaga bardzo wnikliwej ich analizy. Sytuacji nie ułatwia treść rozdziału 1.4, w którym na pierwszym miejscu Autor wymienia swój wkład jako „...weryfikacja wyników symulacji propagacji...”. Trudno bowiem się zgodzić, że weryfikacja wyników symulacji rozkładu propagacji systemu radiowego jest dostatecznym wkładem w rozwój Dyscypliny ITiT na poziomie doktoratu. Niewątpliwie takim wkładem jest natomiast protokół komunikacyjny BX-MAC i to ten element pracy powinien być bardziej uwypuklony. Zweryfikowane przez Autora modele propagacji służą jedynie wykazaniu wyższości protokołu BX-MAC nad rozwiązaniami konkurencyjnymi. Są niewątpliwie wkładem Autora, ale nie najistotniejszym z punktu widzenia naukowego i w ocenie recenzenta jako takie powinny być przedstawione w pracy.
3. Praca nadmiernie uwypukla inżynierską część badań zrealizowanych przez Autora. Autor podaje wiele bardzo szczegółowych danych, co jest niewątpliwie istotne z punktu widzenia możliwości ich reprodukcji, ale powoduje to, że trudny do zidentyfikowania w pracy staje się element naukowy, który przecież bez wątpienia jest w niej obecny. Lepszym z tego punktu widzenia byłby układ pracy, w którym najpierw zaproponowany zostałby nowy algorytm BX-MAC (który jest ogólny), a wszystkie prowadzone przez Autora pomiary i symulacje służące wykazaniu jego wyższości w kontekście konkretnej implementacji byłyby przedstawione w dalszej części pracy.

Uwagi szczegółowe

4. Czy biorąc pod uwagę złożoność oraz zmienność środowiska miejskiego, w którym prowadzone były badania wykorzystanie złożonych modeli propagacyjnych uwzględniających topografię

otoczenia ma w ogóle sens? Jeżeli tak, to jakie są korzyści z zastosowania takich modeli w kontekście protokołu BX-MAC? Czy nie lepszym podejściem byłoby zastosowanie prostych modeli statystycznych opartych na rozkładzie Gaussa?

5. Czy przewaga w zakresie zapotrzebowania na energię protokołu BX-MAC względem protokołów B-MAC i X-MAC występuje dla każdych warunków i każdej konfiguracji urządzeń. Jeżeli nie, to jakie warunki muszą zostać spełnione, żeby protokół ten był bardziej oszczędny pod względem energetycznym?
6. W części eksperymentalnej Autor skoncentrował się na porównaniu protokołu BX-MAC jedynie z protokołami B-MAC i X-MAC. Jakie jest uzasadnienie dla takiego wyboru protokołów do porównania? Czy nie bardziej właściwym byłoby porównanie BX-MAC z protokołami stanowiącymi rozwinięcie protokołu X-MAC, takimi jak np. XX-MAC, TRIX-MAC, czy BoX-MAC lub PW-MAC?
7. Autor w sposób niekonsekwentny wykorzystuje nazewnictwo związane z WSN: sieci bezprzewodowe (np. str. 6, linia 2), sieci sensorowe (np. str. 4, linia 2 od dołu), WSN (str. 4 linia 7), Smart City (str. 8, linia 18), urządzenia telemetryczne IoT (str. 8, linia 23). Nie do końca jasne jest dla recenzenta dlaczego w różnych kontekstach używa różnych nazw i czy ich użycie ma uzasadnienie w kontekście rozpatrywanej tematyki.

W pracy pojawiła się niewielka liczba drobnych błędów redakcyjnych i edycyjnych, w tym w szczególności:

1. Str. 7, linia 15 od dołu: Jest „W tym celu przeprowadzono zaplanowano i wykonano eksperyment” – w rozpatrywanym kontekście przeprowadzenie i wykonanie eksperymentu ma to samo znaczenie. Powinno być: „W tym celu zaplanowano i wykonano eksperyment”.
2. Str. 11, linia 13: Jest „Niniejsze wprowadzenie obejmujące przedstawiające” – nadmiarowy imiesłów. Powinno być albo „obejmujące”, albo „przedstawiające”.
3. Str. 16, linia 6: jest „głównie”, powinno być „głównie”.
4. Str. 21, linia 13: wzór (2.8 pozwala” – brak zamknięcia nawiasu.
5. Str. 22, linia 11: „wzór (2.10 pozwala” – brak zamknięcia nawiasu.
6. Str. 62, linia 8: jest „co oznacza, że można przyjąć jednej wartości odpowiadającej całej populacji”. Z kontekstu wynika, że brakuje słowa „nie”, co fundamentalnie zmienia sens zdania.
7. Str. 64, linia 9 od dołu: Jest „Oprogramowanie tej klasy pozwala, które pozwoli na obliczanie mocy odbieranego sygnału”. Powinno być „Oprogramowanie tej klasy pozwala na obliczanie mocy odbieranego sygnału”.
8. Str. 121, linia 14: Jest „Model charakteryzuje się jest średnim błędem”. Powinno być „Model charakteryzuje się średnim błędem”.

7. Podsumowanie i ocena końcowa

Niezależnie od niewielkiej liczby uwag krytycznych, w ocenie recenzenta rozprawa doktorska mgra inż. Zbigniewa Łaskarzewskiego zatytułowana „Ograniczenie zużycia energii w rozległych sieciach bezprzewodowych niskiej mocy przez zarządzanie sposobem transmisji i nasłuchu” **spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim** zgodnie z art. 187 ust. 1 - 3 „Ustawy z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. 2024 poz. 1571) w dziedzinie Nauk Technicznych, w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja.

Recenzent wnioskuje do Rady Naukowej Instytutu Informatyki Teoretycznej i Stosowanej Polskiej Akademii Nauk o jej przyjęcie i dopuszczenie mgra inż. Zbigniewa Łaskarzewskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Piotr Lipiński