

dr hab. Jarosław Bylina
Instytut Informatyki i Matematyki
Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej
Pl. M. Curie-Skłodowskiej 5
20-031 Lublin
email: jaroslaw.bylina@umcs.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy: Ograniczenie zużycia energii w rozległych sieciach bezprzewodowych niskiej mocy przez zarządzanie sposobem transmisji i nasłuchu

Autor rozprawy: mgr inż. Zbigniew Łaskarzewski

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Krzysztof Grochla, prof. IITiS PAN

Dziedzina: nauki inżyniersko-techniczne

Dyscyplina: informatyka techniczna i telekomunikacja

1 Tematyka rozprawy i jej aktualność

Tematyka rozprawy Pana magistra inżyniera Zbigniewa Łaskarzewskiego koncentruje się na projektowaniu i optymalizacji mechanizmów komunikacyjnych dla rozległych sieci bezprzewodowych niskiej mocy (LPWAN), w szczególności w kontekście zapewnienia wieloletniej pracy urządzeń zasilanych pojedynczą baterią. W obliczu dynamicznego rozwoju Internetu Rzeczy (IoT) oraz masowych wdrożeń systemów telemetrycznych, technologie takie jak LoRaWAN czy NB-IoT stają się fundamentem nowoczesnych systemów komunikacyjnych. Mimo że zostały zaprojektowane z myślą o ograniczonym poborze energii, ich pełny potencjał w zakresie energooszczędności nie jest jeszcze w pełni wykorzystany. Rozprawa podejmuje zatem problem kompleksowego podejścia do minimalizacji zużycia energii, obejmującego nie tylko warstwę fizyczną i dostęp do medium, lecz także projektowanie całego stosu komunikacyjnego, w tym warstwy aplikacyjnej.

Aktualność podjętej tematyki wynika z rosnących wymagań stawianych systemom IoT, w których liczba urządzeń końcowych liczona jest w tysiącach lub milionach, a ich serwisowanie (np. wymiana baterii) generuje istotne koszty operacyjne. W praktyce wiele wdrożeń nadal opiera się na rozwiązaniach, które wywodzą się z systemów przewodowych i nie zostały zaprojektowane z myślą o rygorystycznych ograniczeniach energetycznych. Stąd ich bezprzewodowe implementacje nie zawsze spełniają wymagania nowoczesnych, skalowalnych sieci LPWAN.

Palącym problemem jest też niedostateczne rozpoznanie skuteczności zaawansowanych technik w rzeczywistych, wielkoskalowych sieciach. Choć koncepcje te są znane w literaturze, brakuje kompleksowych analiz uwzględniających rzeczywiste warunki propagacyjne, ograniczenia regulacyjne oraz bilans energetyczny zarówno po stronie urządzeń wybudzanych, jak i inicjujących komunikację. Rozprawa ma istotne znaczenie nie tylko naukowe, lecz także praktyczne — może bowiem przyczynić się do rozwoju rozwiązań wielu zastosowań IoT, w których kluczowe znaczenie ma długotrwała, niezawodna i energooszczędna komunikacja.

2 Zawartość i charakter rozprawy

Rozprawa składa się z sześciu rozdziałów.

Pierwszy z nich stanowi wprowadzenie do rozprawy, przedstawiające tło i kontekst badań, cel oraz tezę pracy, zastosowaną metodologię, a także oryginalny wkład autora wraz z omówieniem struktury całego opracowania. Rozdział 2 zawiera przegląd literatury obejmujący fizyczne aspekty propagacji fal radiowych, modele propagacyjne, regulacyjne uwarunkowania komunikacji bezprzewodowej, budowę i energooszczędne projektowanie urządzeń IoT oraz analizę istniejących protokołów i mechanizmów wspierających efektywność energetyczną. Kolejny rozdział (3) prezentuje wyniki badań eksperymentalnych i symulacyjnych dotyczących propagacji sygnału radiowego, w tym analizę mocy odbieranego sygnału, charakterystyki błędów transmisji, zjawisk zanikania oraz porównanie modeli symulacyjnych z danymi pomiarowymi. Rozdział 4 przedstawia projekt autor-

skiego protokołu komunikacyjnego BX-MAC, opis jego mechanizmów, zasady doboru parametrów oraz analizę zużycia energii w różnych rolach sieciowych. Rozdział 5 omawia implementację tego protokołu w inteligentnym gazomierzu, analizę trybów pracy modułu radiowego, organizację komunikacji w systemie zdalnego odczytu liczników oraz ocenę efektywności energetycznej i czasowej zaproponowanego rozwiązania na tle istniejących systemów. Ostatni rozdział (6) stanowi podsumowanie całej rozprawy — wnioski, osiągnięcia, zastosowania.

Całość rozprawy (która jest pełnym, samodzielny dziełem) stanowi spójne i kompleksowe opracowanie obejmujące analizę teoretyczną, badania eksperymentalne oraz projekt i praktyczną weryfikację nowego, energooszczędnego mechanizmu komunikacji dla sieci LPWAN, ukierunkowanego na zapewnienie wieloletniej pracy urządzeń IoT zasilanych bateryjnie.

3 Cel i teza rozprawy

We *Wprowadzeniu* Doktorant stawia przed sobą cel główny, którym jest:

opracowanie mechanizmów ograniczających zużycie energii urządzeń IoT na poziomie stosu protokołów komunikacyjnych IoT, pozwalających na zapewnienie co najmniej 10-letniego działania urządzenia bez wymiany źródła zasilania z zachowaniem pełnej funkcjonalności.

W bezpośrednim związku z celem pozostaje teza pracy, którą sformułował Doktorant następująco:

Transmisja danych wykorzystująca nasłuch próbkowany oraz ramki wybudzające pozwala na istotne ograniczenie zużycie energii węzłów rozległych sieci bezprzewodowych i zapewnienie wieloletniego czasu ich działania.

Zarówno cel rozprawy, jak i jej teza, są sformułowane jasno i poprawnie. Odzwierciedlają one to, nad czym Autor w rozprawie pracuje. Co bardzo ważne, teza jest oryginalna i wykracza poza obecny stan wiedzy.

Natomiast sama rozprawa wykazuje prawdziwość tezy — istotnie, zaproponowane i zweryfikowane eksperymentalnie mechanizmy komunikacyjne, obejmujące zarówno analizę warunków propagacyjnych, jak i projekt oraz implementację protokołu BX-MAC, prowadzą do istotnej poprawy efektywności energetycznej wymiany danych w sieciach LPWAN, umożliwiając znaczące wydłużenie czasu pracy urządzeń bateryjnych przy zachowaniu wymaganych parametrów niezawodności i zasięgu transmisji.

4 Analiza źródeł i zastany stan wiedzy

Bibliografia recenzowanej rozprawy doktorskiej obejmuje 138 pozycji (różnego rodzaju: artykuły, książki, strony internetowe). Są one zacytowane w odpowiednim kontekście.

Źródła te dobrze obrazują aktualny stan wiedzy na tematy poruszane w pracy. W większości są to źródła nowe (ostatnie pochodzą z roku ukończenia rozprawy), co bardzo pożądane w tego rodzaju tematyce. Autor nie unika jednak cytowania starszych publikacji (także z poprzedniego stulecia, w tym najstarsza z roku 1968), co pokazuje, że tematyka jest nie tylko aktualna, ale dobrze osadzona w historii dorobku naukowego dyscypliny oraz dyscyplin pokrewnych i pokazuje, że zainteresowanie i badania nad komunikacją bezprzewodową nie są nowe i nie pojawiły się w świecie nauki nagle i znikąd.

5 Oryginalny wkład w dyscyplinę i jego znaczenie

Osiągnięcia autorskie Doktoranta zaprezentowane w rozprawie to w szczególności:

- Kompleksowe podejście do problemu energooszczędności w sieciach LPWAN, obejmujące wszystkie warstwy stosu komunikacyjnego (od projektu sprzętu, przez konfigurację modułu radiowego, po warstwę MAC i schemat komunikacji aplikacyjnej), zamiast analizy wyłącznie pojedynczych mechanizmów.
- Sformułowanie i eksperymentalna weryfikacja tezy dotyczącej skuteczności wykorzystania nasłuchu próbkowanego oraz ramek wybudzających w celu istotnego ograniczenia zużycia energii w węzłach rozległych sieci bezprzewodowych.
- Przeprowadzenie 15-dniowych badań terenowych w rzeczywistym środowisku miejskim, obejmujących pomiary mocy sygnału pomiędzy urządzeniami końcowymi a koncentratorami dachowymi, wraz z analizą zależności mocy od odległości oraz charakterystyki błędów bitowych i strat pakietów.
- Identyfikacja i rozdzielenie dwóch składowych zanikania sygnału (wolno- i szybkozmiennej) oraz dopasowanie do nich odpowiednich modeli statystycznych (rozkładu normalnego i rozkładu Rice'a), co umożliwiło ilościowe opisanie zmienności warunków radiowych.
- Wyznaczenie minimalnych poziomów mocy sygnału zapewniających 95% skuteczności transmisji, co stworzyło podstawę do świadomego ograniczania mocy nadawczej i redukcji zużycia energii.
- Opracowanie, kalibracja i weryfikacja modelu symulacyjnego propagacji fal radiowych na podstawie porównania wyników symulacji z danymi pomiarowymi, wraz z oceną wpływu błędu na szacowanie zasięgu, co stanowi narzędzie do planowania sieci i optymalnego rozmieszczenia koncentratorów.
- Zaprojektowanie nowego, autorskiego protokołu łącza danych BX-MAC, łączącego koncepcję nasłuchu próbkowanego i ramek wybudzających z nową strukturą dzielonej preambuły dostosowaną do interwału próbkowania.
- Opracowanie oryginalnej koncepcji ramki wybudzającej.

- Zdefiniowanie mechanizmów uzupełniających protokołu BX-MAC, obejmujących.
- Opracowanie metodyki doboru parametrów protokołu w zależności od roli urządzenia (węzeł końcowy, retransmitter) oraz topologii sieci (gwiazda, sieć wieloskokowa), wraz z analizą energetyczną dla różnych scenariuszy użycia.
- Implementację protokołu BX-MAC w rzeczywistym urządzeniu inteligentnego gazuomierza, obejmującą energooszczędne wykorzystanie trybów pracy modułu radiowego i mikrokontrolera oraz eksperymentalne pomiary zużycia ładunku.
- Opracowanie schematu komunikacji w systemie zdalnego odczytu liczników (wybudzanie, detekcja węzłów w zasięgu, multicastowe odpytanie, uśpienie) oraz jego porównanie z klasycznym modelem periodycznego nadawania.
- Wykazanie, że zastosowanie BX-MAC w systemie odczytu liczników pozwala na redukcję zużycia energii o 39% oraz niemal dwukrotne skrócenie czasu realizacji procesu w porównaniu z rozwiązaniami opartymi na Wireless M-Bus.
- Udowodnienie możliwości wydłużenia czasu pracy urządzeń IoT do 10 lat przy zasilaniu bateryjnym dzięki optymalizacji warstwy dostępu do medium i skróceniu czasu aktywności modułu radiowego.
- Wskazanie uniwersalności opracowanego protokołu i jego zastosowań w systemach stacjonarnych, obchodzonych systemach inkasenckich oraz w sieciach wieloskokowych z retransmisją, w tym w urządzeniach zasilanych bateryjnie.

Wkład rozprawy w dyscyplinę *Informatyka techniczna i telekomunikacja* jest istotny. Praca dotyczy zasadniczego problemu projektowania energooszczędnych systemów komunikacyjnych dla masowych wdrożeń IoT. Praca niewątpliwie rozszerza stan wiedzy w zakresie mechanizmów dostępu do medium i zarządzania aktywnością radiową w sieciach LPWAN, proponując nowe rozwiązania na poziomie warstwy łącza danych. Wnosi także wkład w projektowanie systemów wbudowanych, integrujących warstwę sprzętową i programową w sposób zoptymalizowany pod kątem minimalizacji zużycia energii przy zachowaniu wymaganej funkcjonalności komunikacyjnej.

Nie bez znaczenia jest również połączenie badań teoretycznych, eksperymentalnych i symulacyjnych w spójny model projektowania systemów radiowych. Przeprowadzone pomiary terenowe, statystyczna analiza zanikania sygnału oraz kalibracja modeli propagacyjnych dostarczają wartościowych danych, które mogą być wykorzystywane w dalszych badaniach nad planowaniem i optymalizacją sieci bezprzewodowych. Tym samym rozprawa wzmacnia metodologiczne podstawy projektowania systemów telekomunikacyjnych działających w rzeczywistych warunkach.

Kolejna istotna rzecz, to opracowanie protokołu BX-MAC — jako wkład w rozwój protokołów dostępu do medium. Zaproponowana koncepcja ramki wybudzającej i jej parametryzacja rozszerzają istniejące podejścia do nasłuchu próbkowanego, oferując rozwiązanie możliwe do praktycznego wdrożenia w systemach o bardzo długim wymaganiem

czasie pracy. Ma to znaczenie zarówno dla dalszych prac badawczych nad protokołami, ale także w praktyce zastosowań. W tym też aspekcie rozprawa uwypukla związek między badaniami naukowymi a wdrożeniami przemysłowymi — pokazując, że odpowiednio zaprojektowane mechanizmy komunikacyjne mogą przełożyć się na wieloletnią pracę urządzeń bateryjnych oraz realne oszczędności eksploatacyjne. Tym samym wkład autora wspiera rozwój nowoczesnych systemów teleinformatycznych.

Cała praca stanowi przykład badań o wysokiej wartości poznawczej i implementacyjnej w ramach dyscypliny *Informatyka techniczna i telekomunikacja*.

6 Redakcja rozprawy i prezentacja wyników

Struktura pracy jest uporządkowana i przejrzysta, a podział na poszczególne rozdziały i podrozdziały — logiczny. Warto tu także zwrócić uwagę na pojawiające się na końcu niektórych rozdziałów i podrozdziałów *Podsumowania* oraz *Wnioski* — podkreślające ważniejsze elementy rozprawy i dające czytelnikowi szansę zatrzymania się i zastanowienia nad treścią.

Pracę dobrze się czyta. Jest bowiem napisana starannym językiem, ale także nienajgorzej pod względem typograficznym (choć są tu widoczne pewne problemy, o których niżej). Bez większych zarzutów należy też odnieść się do wyglądu, opisu i czytelności ilustracji, wykresów oraz tabel, których duża liczba ułatwia czytanie i zrozumienie rozprawy. Także interpretacja wykresów zawarta w pracy jest poprawna.

Praca opatrzona jest też należytymi spisami (treści, bibliografii, rysunków, tabel). Format PDF (w którym powstała elektroniczna wersja pracy) umożliwia stosowanie wewnętrznych odnośników — z czego Autor skorzystał (choć nie wszędzie) — co zasługuje na specjalną pochwałę, ułatwia bowiem czytelnikowi poruszanie się po rozprawie.

7 Słabe strony i uwagi krytyczne

Poniżej chciałbym zasygnalizować kilka elementów merytorycznych, co do których mam pewne krytyczne spostrzeżenia.

- Ograniczony jest zakres środowisk pomiarowych (do środowiska miejskiego). Jak się przenoszą wyniki i wnioski tych pomiarów na inne scenariusze (np. zabudowa jednorodzinna, obszary podmiejskie, środowisko przemysłowe)?
- Czas badania jest względnie krótki (15 dni). Nie jest on zbyt krótki, ale (podobnie jak w punkcie powyżej) powstaje pytanie, jak możemy przenieść wyniki i wnioski na inne sytuacje (biorąc pod uwagę wpływ warunków atmosferycznych czy zmiany środowiska radiowego).
- Pewien niedosyt pozostawia potraktowanie skalowalności rozwiązania autorskiego. Nie jest w pełni jasne, jak protokół BX-MAC zachowuje się przy rosnącej liczbie węzłów (w zakresie np. do rzędu 10^5).

- Warto by było pokusić się o szerszą analizę porównawczą — tutaj mamy odniesienie głównie do bardzo popularnego wM-Bus. Co jednak z innymi rozwiązaniami?
- Odniesienie do wyższych warstw sieci jest ograniczone, główny ciężar spoczywa na warstwie MAC. Jest to oczywiste i sensowne, jednak warto by było może rozważyć możliwości optymalizacji na wielu warstwach.
- Warto rozważyć kwestie bezpieczeństwa — szczególnie ataki typu *battery draining*.
- Błąd zakładany jest na poziomie 8,5 dB. Jest to poziom akceptowalny, jednak może utrudnić precyzyjne planowanie. Czy Autor wziął to pod uwagę i czy rozważył możliwości jego dalszej redukcji?
- Jak doświadczenia we wdrażaniu rozwiązania na przedstawionym urządzeniu referencyjnym (inteligentny gazomierz) można rozszerzyć na inne platformy sprzętowe?
- Jaki jest wpływ przedstawionego rozwiązania na złożoność oprogramowania, wymagania pamięciowe czy koszt sprzętu?
- Warto poświęcić więcej miejsca na algorytmy doboru interwału próbkowania, parametrów opóźnień i rozproszenia.
- W pracy brak wyraźnego wskazania ograniczeń proponowanego rozwiązania — warto wprost zidentyfikować sytuacje, w których BX-MAC nie będzie optymalnym wyborem.

Natomiast mam też pewne zastrzeżenia co do formy rozprawy.

- Nie piszemy *Friis'a*, *Rayleigh'a* lecz po prostu *Friisa*, *Rayleigha* (choć *Rice'a* jest już poprawne).
- Wykresy i schematy powinny być wstawione jako grafika wektorowa, nie rastrowa, bo czasem to przeszkadza w odbiorze i analizie rysunku.
- We wzorze (2.12) na stronie 22 brakuje nawiasu zamykającego (choć tu łatwo się domyślić, gdzie powinien być).
- Gdzieś tam brak też zamknięcia nawiasów po numerach wzorów (np. strony 21–22).
- Czy na stronie 68 w tytule sekcji 3.3.2.1 nie powinno być raczej *topograficznych*?
- Ponadto, chciałbym zwrócić uwagę na typografię. Niestety, wybór czcionki (bezszerifowej) oraz narzędzia składu spowodował pewne problemy. Najbardziej widoczne jest to we wzorach matematycznych (których jest dużo — i słusznie). Otóż, same wzory mimo, że są składane raczej czytelnie, to jednak mocno niekonsekwentnie i często wbrew przyjętym konwencjom — takim jak rozmiary nawiasów, odstępy, rozmiary czcionek, ich pochylenie itp. Co więcej, te same elementy (np. nazwy

zmiennych lub stałej π) są inaczej składane we wzorach i w tekście (przede wszystkim z pochyleniem lub nie). Także znak minusa (–) w tekście jest oznaczany (niepoprawnie) przez łącznik (-). Wielu z tych problemów można było uniknąć używając systemu składu L^AT_EX.

Pomimo powyższych uwag krytycznych (które, zebrane w jednym miejscu mogą przytłoczyć), chciałbym podkreślić, że nie wpływają one na merytoryczną wartość pracy w żaden sposób, a są jedynie brakami zrozumiałymi przy tego rodzaju pracy oraz punktami wyjścia do dyskusji i dalszych badań.

8 Podsumowanie i wniosek końcowy

Po lekturze i analizie rozprawy mogę bez wątpliwości stwierdzić, że jest ona przygotowana rzetelnie i wnosi znaczący wkład w dyscyplinę *Informatyka techniczna i telekomunikacja*. Potwierdza ona też zdolność Kandydata do prowadzenia dalszej pracy naukowej samodzielnie. Świadczy także o ugruntowanej ogólnej wiedzy Autora w zakresie nauk inżynieryjno-technicznych i szczegółowej wiedzy odpowiadającej zakresowi badań.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa pt. „Ograniczenie zużycia energii w rozległych sieciach bezprzewodowych niskiej mocy przez zarządzanie sposobem transmisji i nasłuchu” spełnia warunki określone w odpowiedniej Ustawie, a w związku z tym, wnioskuję o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Zbigniewa Łaskarzewskiego do publicznej obrony i dalszych etapów postępowania doktorskiego.

Ponadto, z uwagi na wysoką wartość merytoryczną pracy — potwierdzoną publikacjami w recenzowanych czasopismach naukowych — oraz jej szeroki zakres wnioskuję o stosowne wyróżnienie recenzowanej rozprawy doktorskiej.

Jarosław Bylina