

dr hab. inż. Mikołaj Leszczuk, prof. AGH

Kraków, 13 stycznia 2026 r.

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji

Instytut Telekomunikacji

al. Mickiewicza 30

30-059 Kraków

mikolaj.leszczuk@agh.edu.pl

RECENZJA

mgr inż. Zbigniew Łaskarzewski

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

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

Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej

Polskiej Akademii Nauk

Znaczenie rozprawy

Rozprawa podejmuje aktualny i istotny problem inżynierski, jakim jest ograniczenie zużycia energii w sieciach LPWAN przy jednoczesnym zachowaniu niezawodności transmisji oraz użyteczności systemów w rzeczywistych wdrożeniach Internetu Rzeczy. Autor trafnie identyfikuje sprzeczność pomiędzy długim czasem życia węzłów bateryjnych a wymaganiami dotyczącymi dostępności danych, opóźnień oraz odporności na zakłócenia, które w praktyce często prowadzą do kompromisów obniżających efektywność energetyczną. Problem ten ma charakter zarówno naukowy, jak i wyrażnie aplikacyjny, ponieważ dotyczy systemów masowo wdrażanych w monitoringu środowiskowym, infrastrukturze krytycznej czy rozwiązaniach smart city.

Centralnym wkładem rozprawy jest spójne ujęcie zagadnienia zarządzania energią przez analizę i modelowanie mechanizmów transmisji oraz nasłuchu w sieciach LPWAN, ze szczególnym uwzględnieniem technologii LoRaWAN. Autor nie ogranicza się do analizy pojedynczych parametrów, lecz pokazuje wzajemne zależności pomiędzy czasem aktywności radiowej, konfiguracją warstwy MAC, strategią retransmisji oraz warunkami propagacyjnymi. Takie podejście pozwala przejść od punktowych optymalizacji do projektowania całościowej strategii komunikacji, w której zużycie energii jest traktowane jako wielkość systemowa, a nie uboczny efekt ustawień protokołu.

Istotnym elementem pracy jest połączenie rozważań teoretycznych z analizą danych pochodzących z rzeczywistych eksperymentów i wdrożeń testowych. Zaprezentowane wyniki pokazują, że odpowiednie sterowanie oknami nasłuchu, doбором parametrów transmisji oraz częstotliwością komunikacji zwrotnej pozwala istotnie zmniejszyć pobór energii bez degradacji jakości usług. Z punktu widzenia praktyki inżynierskiej oznacza to możliwość wydłużenia czasu życia węzłów końcowych oraz ograniczenia kosztów eksploatacyjnych systemów IoT, bez konieczności ingerencji w warstwę sprzętową.

Znaczenie naukowe rozprawy polega na uporządkowaniu i ilościowym opisanu mechanizmów, które w literaturze często analizowane są fragmentarycznie lub w oderwaniu od rzeczywistych scenariuszy pracy sieci. Autor proponuje podejście, które może stanowić punkt odniesienia dla dalszych badań porównawczych nad efektywnością energetyczną LPWAN, a także dla projektowania nowych algorytmów adaptacyjnych. W perspektywie dalszego rozwoju pracy zasadne byłoby jeszcze pełniejsze skwantyfikowanie wpływu zmiennych środowiskowych oraz obciążenia sieci na bilans energetyczny węzłów, co dodatkowo wzmocniłoby uniwersalność zaproponowanych wniosków.

Problem badawczy

Współczesne sieci LPWAN, w szczególności LoRaWAN, projektowane są z myślą o bardzo długim czasie życia węzłów końcowych, często liczonym w latach pracy na pojedynczym źródle zasilania. Jednocześnie systemy te muszą spełniać wymagania dotyczące niezawodności, dostępności danych oraz odporności na zmienne warunki propagacyjne i obciążenie sieci. W praktyce prowadzi to do konfliktu pomiędzy dążeniem do minimalizacji zużycia energii a koniecznością utrzymania parametrów jakościowych transmisji na poziomie akceptowalnym dla aplikacji użytkowych. Problem ten jest dodatkowo komplikowany przez fakt, że mechanizmy odpowiedzialne za zużycie energii są rozproszone pomiędzy warstwami systemu: od fizycznych parametrów transmisji radiowej, przez działanie protokołu MAC, aż po strategię zarządzania ruchem i nasłuchem po stronie węzła oraz infrastruktury sieciowej.

Istotną trudność stanowi brak jednoznacznej, całościowej procedury pozwalającej na ilościową ocenę i kontrolę bilansu energetycznego węzłów LPWAN w warunkach rzeczywistej eksploatacji. W literaturze przedmiotu dominują analizy cząstkowe, skupione na pojedynczych aspektach, takich jak dobór parametrów modulacji, częstotliwość transmisji czy mechanizmy retransmisji. Rzadziej spotyka się podejście integrujące te elementy w spójny model uwzględniający zarówno charakterystykę pracy węzła końcowego, jak i dynamikę całej sieci. W efekcie projektanci systemów IoT często opierają się na heurystykach lub ustawieniach domyślnych, których wpływ na zużycie energii i jakość usług nie jest w pełni przewidywalny ani weryfikowalny.

Na tym tle rozprawa formułuje problem badawczy jako potrzebę opracowania metodycznego podejścia do analizy i optymalizacji zużycia energii w sieciach LPWAN, przy zachowaniu funkcjonalności i niezawodności komunikacji. Autor stawia sobie za cel: po pierwsze, identyfikację kluczowych mechanizmów transmisji i nasłuchu, które w największym stopniu wpływają na bilans energetyczny węzłów końcowych; po drugie, ilościowy opis zależności pomiędzy konfiguracją protokołu, warunkami radiowymi a poborem energii; po trzecie, integrację tych elementów w spójny model umożliwiający ocenę skutków projektowych decyzji na poziomie całego systemu.

Realizacja tak sformułowanego problemu wymagała połączenia analiz teoretycznych z badaniami eksperymentalnymi, prowadzonymi w warunkach zbliżonych do rzeczywistych wdrożeń. Autor koncentruje się na mechanizmach typowych dla LoRaWAN, takich jak czas aktywności radiowej, strategia nasłuchu w oknach odbiorczych, dobór parametrów transmisji oraz obsługa retransmisji, pokazując, w jaki sposób ich wzajemne oddziaływanie przekłada się na zużycie energii. Kluczowe znaczenie ma tu możliwość prześledzenia pełnej ścieżki: od ustawień systemowych i warunków pracy sieci, przez zachowanie węzła końcowego, aż do mierzalnych efektów energetycznych.

Podsumowując, problem badawczy rozprawy polegał na zaprojektowaniu i empirycznym zweryfikowaniu spójnego podejścia do zarządzania zużyciem energii w sieciach LPWAN, które

wykracza poza punktowe optymalizacje i pozwala na ilościową ocenę kompromisów pomiędzy energooszczędnością a jakością komunikacji. Zaproponowane ujęcie tworzy podstawę do dalszych badań nad adaptacyjnymi mechanizmami sterowania pracą węzłów oraz do bardziej świadomego projektowania systemów IoT o długim czasie życia.

Hipoteza i tezy pracy

Rozprawa opiera się na tezie, że świadome i spójne zarządzanie mechanizmami transmisji oraz nasłuchu w sieciach LPWAN, zintegrowane w jednolitym modelu analityczno-eksperymentalnym, umożliwia istotne ograniczenie zużycia energii węzłów końcowych przy zachowaniu funkcjonalności i niezawodności komunikacji. Autor zakłada, że efektywność energetyczna nie jest własnością pojedynczego parametru czy mechanizmu protokołu, lecz wynika z łącznego oddziaływania czasu aktywności radiowej, konfiguracji warstwy MAC, strategii retransmisji oraz warunków pracy sieci. Odpowiednie powiązanie tych elementów pozwala na ilościowo mierzalną i porównywalną ocenę kompromisów pomiędzy energooszczędnością a jakością usług.

W szczegółowym ujęciu teza pracy zakłada, że dla kluczowych aspektów funkcjonowania węzłów LPWAN – takich jak czas nadawania i nasłuchu, częstość komunikacji zwrotnej, liczba retransmisji czy wpływ adaptacji parametrów transmisji – możliwe jest zdefiniowanie operacyjnych wskaźników, które dają się wiarygodnie mierzyć w warunkach zbliżonych do rzeczywistych wdrożeń. Na ich podstawie można nie tylko ocenić bieżący bilans energetyczny węzła, lecz także porównywać różne konfiguracje protokołu oraz scenariusze pracy sieci w sposób powtarzalny i audytowalny.

Autor przyjmuje ponadto, że odpowiedni dobór i sterowanie parametrami transmisji oraz mechanizmami nasłuchu prowadzi do zauważalnego obniżenia zużycia energii bez pogorszenia podstawowych parametrów jakościowych komunikacji. Efekty te powinny być możliwe do wykazania empirycznie, a uzyskane zależności nie mogą mieć charakteru incydentalnego, lecz powinny utrzymywać się w szerokim zakresie realistycznych warunków propagacyjnych i obciążeń sieci. Istotnym elementem hipotezy jest także założenie, że analiza prowadzona na poziomie całego systemu – a nie pojedynczych mechanizmów – pozwala lepiej zrozumieć źródła strat energetycznych i wskazać miejsca, w których interwencja projektowa przynosi największy efekt.

W pracy zakłada się stabilność wniosków względem umiarkowanych zmian parametrów środowiskowych i konfiguracyjnych. Oznacza to, że obserwowane trendy w zużyciu energii oraz jakości komunikacji nie powinny ulegać odwróceniu przy typowych wahaniami warunków radiowych czy natężenia ruchu, a granice rozstrzygalności wyników powinny być możliwe do jednoznacznego wskazania. Jednocześnie przyjęta logika analizy ma mieć charakter przenośny, tak aby mogła być stosowana również do innych konfiguracji sieci LPWAN, przy zachowaniu koniecznej parametryzacji specyficznej dla danej technologii lub scenariusza zastosowania.

Warunki falsyfikacji tezy są jednoznaczne. Teza nie zostałaby utrzymana, gdyby nie było możliwe wiarygodne zmierzenie kluczowych wielkości energetycznych w warunkach rzeczywistej pracy sieci, gdyby zmiany konfiguracji transmisji i nasłuchu nie prowadziły do istotnych i powtarzalnych różnic w zużyciu energii, bądź gdyby uzyskane oszczędności energetyczne wiązały się z nieakceptowalnym pogorszeniem jakości komunikacji. Brak spójności pomiędzy analizą teoretyczną a wynikami eksperymentalnymi również podważałby centralną hipotezę pracy.

Rozwiązania praktyczne

Rozprawa nie sprowadza się do pojedynczego algorytmu, lecz proponuje spójny zestaw rozwiązań umożliwiających praktyczną analizę i ocenę zużycia energii w sieciach LPWAN w warunkach zbliżonych do rzeczywistych wdrożeń. Autor konsekwentnie przekłada rozważania teoretyczne na procedury pomiarowe i analityczne, które pozwalają ilościowo opisać wpływ mechanizmów transmisji i nasłuchu na bilans energetyczny węzłów końcowych. Dzięki temu praca ma wyraźny charakter aplikacyjny i może być używana nie tylko w badaniach naukowych, lecz także w procesie projektowania i optymalizacji systemów Internetu Rzeczy. Kluczowym rozwiązaniem praktycznym jest metodyczne ujęcie zużycia energii jako efektu współdziałania wielu elementów systemu komunikacyjnego, a nie pojedynczego parametru protokołu. Autor pokazuje, w jaki sposób czas aktywności radiowej, konfiguracja okien nasłuchu, strategia retransmisji oraz dobór parametrów transmisji wpływają na pobór energii węzła końcowego. Takie podejście umożliwia przejście od intuicyjnych lub domyślnych ustawień do świadomego sterowania zachowaniem urządzeń w sieci LPWAN.

Istotnym aspektem praktycznym jest zaproponowanie mierzalnych wskaźników energetycznych, które mogą być pozyskiwane na działających węzłach i analizowane w realistycznych scenariuszach pracy sieci. Autor pokazuje, że możliwe jest jednoznaczne powiązanie konfiguracji warstwy MAC oraz strategii komunikacji zwrotnej z obserwowanym zużyciem energii, co pozwala porównywać różne warianty konfiguracji w sposób powtarzalny i audytowalny. Rozwiązanie to ma szczególne znaczenie dla inżynierów wdrożeniowych, którzy muszą podejmować decyzje projektowe przy ograniczonej wiedzy o długoterminowych skutkach energetycznych.

Praca oferuje również praktyczne wnioski dotyczące kompromisów pomiędzy energooszczędnością a jakością komunikacji. Autor pokazuje, że redukcja zużycia energii nie musi prowadzić do nieakceptowalnego pogorszenia niezawodności transmisji, o ile mechanizmy transmisji i nasłuchu są analizowane łącznie i w kontekście warunków pracy sieci. W tym sensie rozprawa dostarcza narzędzi do racjonalnego doboru parametrów systemu, zamiast prostego minimalizowania aktywności radiowej kosztem funkcjonalności.

Z punktu widzenia wdrożeń istotna jest również możliwość odtworzenia zaproponowanych analiz. Autor jasno opisuje procedury pomiarowe oraz sposób interpretacji wyników, co umożliwia ich ponowne zastosowanie w innych instalacjach LPWAN oraz porównywanie wyników pomiędzy różnymi systemami i scenariuszami eksploatacyjnymi. Taki „ślad audytowy” analizy energetycznej jest rzadko spotykany w pracach o charakterze aplikacyjnym i stanowi wyraźną wartość dodaną rozprawy.

W rezultacie rozprawa Zbigniewa Łaskarzewskiego dostarcza praktycznych narzędzi do świadomego projektowania i oceny systemów LPWAN pod kątem zużycia energii. Zaproponowane podejście pozwala nie tylko lepiej zrozumieć źródła strat energetycznych, lecz także podejmować decyzje projektowe oparte na danych empirycznych, co ma bezpośrednie znaczenie dla trwałości, kosztów utrzymania i skalowalności systemów Internetu Rzeczy.

Wkład nowatorski

Nowość rozprawy polega na zaproponowaniu i empirycznym zweryfikowaniu spójnego, praktycznie użytecznego podejścia do analizy i ograniczania zużycia energii w sieciach LPWAN, w szczególności w technologii LoRaWAN. Autor wychodzi poza typowe w literaturze analizy fragmentaryczne, koncentrujące się na pojedynczych parametrach protokołu i proponuje ujęcie systemowe, w którym zużycie energii jest efektem współdziałania mechanizmów transmisji, nasłuchu, retransmisji oraz warunków pracy sieci. Istotą wkładu jest nie tylko

identyfikacja tych zależności, lecz także ich osadzenie w procedurach pomiarowych możliwych do zastosowania w rzeczywistych wdrożeniach.

Najważniejszym elementem nowatorskim jest zbudowanie spójnego szkieletu analityczno-eksperymentalnego, który łączy obserwacje na poziomie węzła końcowego z zachowaniem całej sieci LPWAN. Autor pokazuje, w jaki sposób decyzje podejmowane na poziomie konfiguracji warstwy MAC oraz strategii komunikacji zwrotnej przekładają się na mierzalny bilans energetyczny urządzeń końcowych. W odróżnieniu od wielu wcześniejszych prac, nie są to rozważania oderwane od praktyki, lecz oparte na danych empirycznych pozyskanych w realistycznych scenariuszach pracy systemu.

Nowatorski charakter ma również zaproponowanie operacyjnych wskaźników umożliwiających ilościową ocenę zużycia energii węzłów LPWAN. Autor wskazuje, które wielkości są faktycznie mierzalne w działających systemach i w jaki sposób mogą być używane do porównań pomiędzy różnymi konfiguracjami protokołu i scenariuszami eksploatacyjnymi. Dzięki temu możliwe staje się przejście od intuicyjnych ocen energochłonności do podejścia opartego na danych, porównywalnego i możliwego do audytu.

Istotnym elementem wkładu jest także pokazanie, że poprawa efektywności energetycznej nie musi oznaczać prostego ograniczania aktywności radiowej kosztem funkcjonalności systemu. Autor wykazuje, że przy odpowiednim powiązaniu mechanizmów transmisji i nasłuchu możliwe jest uzyskanie oszczędności energetycznych przy zachowaniu akceptowalnego poziomu niezawodności i dostępności danych. W ten sposób rozprawa wnosi nową perspektywę do projektowania systemów LPWAN, w której kompromisy pomiędzy energooszczędnością a jakością komunikacji są analizowane i zarządzane w sposób świadomy, a nie ad hoc.

Cechą wyróżniającą zaproponowane podejście jest jego potencjalna odtwarzalność i przenaszalność. Autor dba o to, aby cały tok analizy – od pozyskania danych, przez ich interpretację, aż po wnioski energetyczne – był jednoznacznie opisany i możliwy do ponownego zastosowania w innych instalacjach LPWAN. Dzięki temu rozprawa nie ogranicza się do jednego przypadku badawczego, lecz oferuje uniwersalny schemat postępowania, który może być użyty zarówno w badaniach porównawczych, jak i w procesie projektowania oraz oceny systemów IoT.

W tej postaci wkład rozprawy ma charakter oryginalny i praktycznie użyteczny. Autor przekuwa rozproszone obserwacje dotyczące pracy sieci LPWAN w spójne, wdrażalne podejście do oceny i poprawy efektywności energetycznej, które może służyć zarówno celom naukowym, jak i inżynierskim – od fazy projektowej po długoterminową eksploatację systemów Internetu Rzeczy.

Oryginalne wyniki badań i ich znaczenie

Rozprawa stanowi syntetyczne i spójne podsumowanie wieloletnich badań autora nad funkcjonowaniem sieci LPWAN, w szczególności w kontekście efektywności energetycznej, niezawodności transmisji oraz praktycznych ograniczeń dużych, rzeczywistych wdrożeń. Jej istotą nie jest przedstawienie pojedynczego algorytmu, lecz uporządkowanie i empiryczne zweryfikowanie zależności pomiędzy mechanizmami transmisji, nasłuchu i organizacji ruchu w sieci a zużyciem energii węzłów końcowych. Autor konsekwentnie pokazuje, w jaki sposób obserwacje cząstkowe, znane z wcześniejszych prac, składają się na spójny obraz zachowania systemu LPWAN jako całości.

Do najważniejszych oryginalnych wyników badań należy zaliczyć zdefiniowanie koherentnego zestawu celów i miar operacyjnych umożliwiających ilościową ocenę efektywności sieci

LPWAN w warunkach zbliżonych do rzeczywistych wdrożeń. Autor nie ogranicza się do wskaźników teoretycznych, lecz koncentruje się na wielkościach możliwych do pozyskania w praktyce: zużyciu energii węzłów, skuteczności dostarczania pakietów, wpływie retransmisji, strategii nasłuchu oraz obciążenia infrastruktury bramowej. Takie podejście pozwala porównywać różne konfiguracje sieci i protokołu w sposób powtarzalny i audytowalny.

Istotnym osiągnięciem rozprawy jest wykazanie, że zużycie energii w sieciach LPWAN nie jest prostą funkcją częstotliwości transmisji, lecz wynika z interakcji wielu mechanizmów warstwy MAC i warunków pracy sieci. Na podstawie badań symulacyjnych i pomiarowych autor pokazuje, w jakich sytuacjach nadmierne retransmisje, niewłaściwa konfiguracja okien nasłuchu lub nieoptymalne przypisanie ról przekaźnikowych prowadzą do istotnego pogorszenia bilansu energetycznego, nawet jeśli pojedyncze węzły spełniają nominalne założenia protokołu. Wyniki te mają bezpośrednie znaczenie dla projektowania sieci o dużej skali, co znajduje potwierdzenie w publikacjach autora poświęconych analizie wydajności dużych sieci LoRa oraz algorytmom energetycznie świadomego przydziału ról w LPWAN, opublikowanych w wysoko punktowanych czasopismach i materiałach konferencyjnych.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że przedstawione wyniki są silnie osadzone w dorobku publikacyjnym autora o wyraźnej rozpoznawalności punktowej. Rozprawa integruje rezultaty prac opublikowanych m.in. w czasopismach i konferencjach o punktacji 140 punktów (ACM Transactions on Sensor Networks; Scientific Reports), 100 punktów (Applied Sciences), a także 70 punktów (IWCMC, MASCOTS, ICCCI), uzupełnione publikacjami o charakterze krajowym (20 punktów). Łączna punktacja prac bezpośrednio powiązanych tematycznie z rozprawą potwierdza zarówno skalę, jak i ciągłość prowadzonej linii badawczej oraz jej zgodność z aktualnymi kryteriami oceny jakości dorobku naukowego.

Ważnym elementem oryginalnym jest również powiązanie analiz energetycznych z zagadnieniami topologii i organizacji sieci. Autor wykazuje, że decyzje dotyczące lokalizacji bram, przypisania węzłów do przekaźników czy doboru parametrów transmisji wpływają nie tylko na jakość komunikacji, lecz także na długoterminowe zużycie energii urządzeń końcowych. W tym sensie rozprawa wnosi istotny wkład do badań nad projektowaniem energooszczędnych sieci LPWAN, integrując zagadnienia dotychczas rozpatrywane oddzielnie. Znaczenie praktyczne uzyskanych wyników polega na dostarczeniu projektantom i integratorom systemów IoT narzędzi umożliwiających świadome podejmowanie decyzji projektowych. Rozprawa pokazuje, w jaki sposób na podstawie danych empirycznych można ocenić kompromisy pomiędzy energooszczędnością, niezawodnością i skalowalnością sieci LPWAN, bez odwoływania się do uproszczonych założeń teoretycznych. Dzięki temu możliwe staje się projektowanie systemów o przewidywalnym czasie życia węzłów i stabilnych parametrach pracy.

Podsumowując, oryginalność wyników rozprawy nie wynika z pojedynczego rozwiązania technicznego, lecz z integracji rozproszonych badań w spójne, empirycznie potwierdzone podejście do analizy i optymalizacji sieci LPWAN. Skala i jakość publikacji, potwierdzona ich punktacją, wzmacnia wagę przedstawionych rezultatów i jednoznacznie wskazuje, że rozprawa opiera się na dorobku rozpoznawalnym międzynarodowo, o jednoczesnym znaczeniu aplikacyjnym dla rzeczywistych wdrożeń systemów Internetu Rzeczy.

Wartość techniczna rozprawy

Rozprawa świadczy o dojrzałym i całościowym opanowaniu technicznych aspektów projektowania, analizy oraz oceny sieci LPWAN, w szczególności w kontekście ich efektywności energetycznej i pracy w dużej skali. Autor swobodnie porusza się pomiędzy warstwą fizyczną

i MAC (parametry transmisji, retransmisje, nasłuch, propagacja), zagadnieniami organizacji sieci (topologia, lokalizacja bram, przypisanie ról przekaźnikowych) oraz aspektami pomiarowymi i analitycznymi (pozyskiwanie danych, metryki, interpretacja wyników). Takie połączenie perspektywy inżynierii systemów z praktyką analizy danych i modelowania sieci stanowi istotną wartość techniczną pracy.

Techniczna dojrzałość ujawnia się przede wszystkim w podejściu end-to-end do problemu zużycia energii. Autor nie traktuje poboru mocy jako abstrakcyjnej wielkości teoretycznej, lecz konsekwentnie śledzi jego źródła wzdłuż całego toru komunikacyjnego: od decyzji o nadaniu pakietu, przez mechanizmy nasłuchu i retransmisji, aż po skutki na poziomie obciążenia sieci i infrastruktury bramowej. Dzięki temu możliwe jest jednoznaczne powiązanie jakości poszczególnych mechanizmów protokołu z obserwowanym bilansem energetycznym węzłów końcowych.

Drugim elementem świadczącym o wysokiej wartości technicznej jest sposób traktowania pomiarów operacyjnych. Autor konsekwentnie opiera analizę na wielkościach możliwych do pozyskania w działających systemach LPWAN, takich jak zużycie energii, skuteczność dostarczania pakietów, liczba retransmisji czy opóźnienia komunikacyjne. Zamiast pozostawiać te zagadnienia na poziomie opisowym, definiuje jasne metryki i pokazuje ich zachowanie w realistycznych scenariuszach pracy sieci, w tym w instalacjach o dużej liczbie węzłów. Takie podejście zwiększa wiarygodność wniosków i ułatwia ich praktyczne użycie.

Na podkreślenie zasługuje również warstwa implementacyjna i analityczna pracy. Autor prezentuje potencjalnie uruchamialne procedury pomiarowe, symulacyjne i analityczne, z wyraźnym rozdzieleniem etapów przetwarzania danych oraz możliwością odtworzenia obliczeń. Zapewnienie takiego „śladu technicznego” ułatwia zarówno ewentualną weryfikację wyników, jak i ich użycie w dalszych badaniach lub wdrożeniach przemysłowych, gdzie testy regresji i porównywanie konfiguracji są kluczowe.

Studia przypadków dotyczące dużych sieci LoRa oraz algorytmów energetycznie świadomego przydziału ról pokazują, w jaki sposób zaproponowane metody przekładają się na praktyczne decyzje projektowe. Autor nie ogranicza się do prezentacji wyników liczbowych, lecz pokazuje, które elementy konfiguracji sieci mają największy wpływ na zużycie energii i jakie kompromisy muszą być podejmowane przy skalowaniu systemu. Dzięki temu czytelnik otrzymuje nie tylko wyniki badań, ale również narzędzia do ich interpretacji w kontekście rzeczywistych wdrożeń. Dla pełności obrazu można wskazać dwa obszary, które mogłyby zostać jeszcze bardziej doprecyzowane. Po pierwsze, użyteczne byłoby bardziej jednoznaczne zestawienie rekomendowanych zakresów parametrów i progów decyzyjnych dla typowych scenariuszy pracy sieci, co ułatwiłoby bezpośrednie zastosowanie w praktyce. Po drugie, krótka analiza czułości wyników na zmiany warunków propagacyjnych i obciążenia sieci pozwoliłaby lepiej oszacować granice stosowalności zaproponowanych wniosków. Są to jednak kwestie o charakterze uzupełniającym, które nie podważają wysokiej wartości technicznej rozprawy ani widocznej biegłości autora w analizowanej tematyce.

Ograniczenia i wyzwania

Rozprawa jest technicznie spójna i konsekwentnie prowadzona, natomiast jej zakres empiryczny – jak to zwykle bywa w pracach skoncentrowanych na konkretnym rozwiązaniu protokołowym – jest w dużej mierze podporządkowany jednemu, dobrze zdefiniowanemu kontekstowi wdrożeniowemu. Weryfikacja zaproponowanych mechanizmów (w szczególności protokołu BX-MAC, opartego o nasłuch próbkowany i ramki wybudzające) została przeprowadzona w oparciu o realną implementację systemu zdalnego odczytu gazomierzy, z

uwzględnieniem praktycznych ograniczeń mikrokontrolerów i modułów radiowych. To duży atut, ale jednocześnie oznacza, że uogólnienie wyników na inne klasy urządzeń IoT, inne profile ruchu oraz odmienne technologie radiowe pozostaje zweryfikowane w ograniczonym stopniu.

Przechodząc do uwag szczegółowych, to, po pierwsze, w pracy dominuje perspektywa konkretnego typu aplikacji (telemetria liczników mediów, w tym scenariusz odczytu obchodzonego) i wynikających z niej priorytetów: wieloletniego czasu pracy, rzadkiej komunikacji, prostoty warstwy MAC oraz minimalizacji kosztów energetycznych po stronie węzłów. W konsekwencji nie wszystkie wnioski muszą przenosić się wprost na zastosowania wymagające innych kompromisów, np. częstych transmisji, silnych wymagań opóźnieńowych, częstej komunikacji w dół łączy czy pracy w środowiskach o wysokiej dynamice zakłóceń i zmienności topologii. Dotyczy to zwłaszcza oceny zachowania protokołu w scenariuszach dużego zagęszczenia węzłów i jednoczesnych prób dostępu do medium, gdzie wzrasta ryzyko kolizji oraz koszt energetyczny procedur ponawiania.

Po drugie, mimo że autor porównuje BX-MAC do rozwiązań referencyjnych (w szczególności B-MAC i X-MAC) i jasno uzasadnia, jakie ich wady chce obejść, brakuje w pracy szerszego, systematycznego odniesienia do wartości bazowych spoza tej klasy protokołów – zwłaszcza tych, które dominują we współczesnym IoT, takich jak mechanizmy typowe dla LoRaWAN/NB-IoT, bądź praktyki spotykane w rozwiązaniach komercyjnych dla smart meteringu. Nawet jeśli nie jest celem pracy pełna analiza porównawcza standardów, to jednoznaczne „zakotwiczenie” wyników na tle alternatywnych podejść ułatwiłoby czytelnikowi ocenę, gdzie dokładnie BX-MAC wypada najlepiej, a gdzie jego przewaga może być mniejsza.

Po trzecie, część modeli i analiz (w tym dotyczących propagacji i zasięgu, a także symulacji) opiera się na przyjętych założeniach, które są uzasadniane, ale nie zawsze prowadzą do pełnej oceny czułości wyników na parametry środowiskowe. W praktyce wdrożeniowej istotne bywa pytanie nie tylko „czy działa”, ale „jak bardzo” wynik zmieni się przy realistycznych wahaniach: poziomu szumu, chwilowych interferencji, sezonowej zmienności tłumienia, różnic montażowych urządzeń, dryfu zegarów RTC oraz rozrzutu parametrów energetycznych egzemplarzy (w tym zmian po latach eksploatacji). Krótka, uporządkowana analiza niepewności i wrażliwości na kluczowe parametry (np. interwały nasłuchu, czasy przełączeń Tx/Rx, błędy zegara, profil ruchu w sieci) wzmocniłaby „przenaszalność” wniosków.

Po czwarte, warstwa wdrożeniowa została pokazana przekonująco, ale z perspektywy odtwarzalności zewnętrznej brakuje kompletnego pakietu uruchomieniowego (konfiguracje, skrypty, dane wejściowe/wyjściowe w postaci umożliwiającej niezależną reprodukcję całego toru). W tekście pojawiają się odniesienia do artefaktów obliczeniowych i konfiguracyjnych, jednak nie tworzą one zamkniętej paczki „od zera do wyniku”, co utrudniałoby pełną replikację przez inny zespół.

Po piąte, praca koncentruje się na efektywności energetycznej i sprawności procesu komunikacyjnego, natomiast kwestie bezpieczeństwa (szyfrowanie, uwierzytelnianie, odporność na nadużycia protokołowe), choć w dorobku autora obecne tematycznie, w samej rozprawie nie są potraktowane jako mierzalny cel projektowy protokołu i wdrożenia. W praktyce smart meteringu oraz systemów krytycznych jest to obszar, który często determinuje dopuszczalny zestaw kompromisów energetycznych, dlatego choć nie musi stanowić osi pracy, to cenne byłoby wskazanie granic i konsekwencji projektowych.

Wreszcie, od strony edytorskiej należy odnotować, że część rycin i wykresów została zamieszczona w jakości utrudniającej komfortowy odczyt szczegółów – są to grafiki rastrowe o zbyt niskiej rozdzielczości, podczas gdy w pracy o charakterze inżynierskim wskazane byłoby

stosowanie grafiki wysokiej jakości albo najlepiej, formatu wektorowego. Nie wpływa to na meritum, ale realnie utrudnia weryfikację i lekturę wybranych fragmentów.

Powyższe uwagi nie zmieniają zasadniczej oceny wartości pracy: wskazują raczej obszary, które – przy ambicji przeniesienia wniosków na szersze klasy wdrożeń IoT – warto byłoby doprecyzować lub rozszerzyć. Rozprawa broni się przede wszystkim tym, że pokazuje drogę od koncepcji protokołu i modeli do realnej implementacji oraz weryfikacji na rzeczywistym systemie zdalnego odczytu, co w tej tematyce jest osiągnięciem rzadkim i praktycznie istotnym.

Ocena zgodności z wymaganiami naukowymi

Rozprawa podejmuje istotny i aktualny problem badawczy związany z ograniczaniem zużycia energii w sieciach LPWAN przez świadome zarządzanie mechanizmami transmisji i nasłuchu. Autor trafnie identyfikuje lukę pomiędzy rozwiązaniami protokołowymi opisywanymi w literaturze a rzeczywistymi wdrożeniami systemów Internetu Rzeczy, w których kluczowe znaczenie mają długoterminowa energooszczędność, niezawodność komunikacji oraz odporność na warunki środowiskowe i skalę sieci. Sformułowane pytania badawcze są jasne, a cel ogólny pracy – spójny i konsekwentnie realizowany w kolejnych rozdziałach.

Na tle standardowych kryteriów stawianych rozprawom doktorskim wkład koncepcyjny autora należy ocenić pozytywnie. Rozprawa nie ogranicza się do analizy pojedynczych parametrów protokołu, lecz proponuje całościowe ujęcie problemu efektywności energetycznej, obejmujące interakcje pomiędzy warstwą fizyczną, MAC oraz organizacją ruchu w sieci. Szczególnie wartościowe jest powiązanie rozważań teoretycznych z wynikami badań symulacyjnych i pomiarowych, prowadzonych w kontekście rzeczywistych systemów telemetrycznych, w tym wdrożeń związanych ze zdalnym odczytem liczników. Dzięki temu przedstawione wnioski mają nie tylko charakter poznawczy, ale również aplikacyjny.

Warstwa metodyczna pracy jest poprawna i logicznie uporządkowana, choć w kilku miejscach mogłaby zostać doprecyzowana. Dotyczy to przede wszystkim formalnego zestawienia przyjętych parametrów, progów decyzyjnych oraz zakresów ich zmienności, co ułatwiłoby niezależną replikację badań. Podobnie, bardziej zwarta analiza czułości wyników na zmiany kluczowych parametrów – takich jak warunki propagacyjne, zagęszczenie sieci czy profile ruchu – wzmocniłaby argumentację dotyczącą przenaszalności zaproponowanych wniosków na inne scenariusze wdrożeniowe. Walidacja empiryczna, choć celowo skupiona na wybranych technologiach i przypadkach użycia, ma charakter wiarygodny, lecz nie wyczerpuje całego spektrum możliwych konfiguracji LPWAN.

Pewne zastrzeżenia można również sformułować na poziomie redakcyjnym. Miejscami pojawiają się niejednoznaczności w oznaczeniach symboli i jednostek, a jakość części rycin i wykresów utrudnia precyzyjny odczyt prezentowanych zależności. Są to jednak kwestie drugorzędne, które nie wpływają na ocenę merytorycznej zawartości pracy.

Podsumowując, wskazane uwagi mają charakter uzupełniający i nie podważają zasadniczej wartości rozprawy. W mojej ocenie praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Zawiera oryginalny wkład naukowy, jest poprawnie umotywowana teoretycznie i empirycznie, a uzyskane wyniki mają znaczenie zarówno naukowe, jak i praktyczne w kontekście projektowania i eksploatacji sieci LPWAN.

Końcowe wnioski recenzji (konkluzja)

Pomimo zgłoszonych wcześniej uwag i wskazanych ograniczeń stwierdzam, że:

1. Cel rozprawy został osiągnięty. Przedstawione badania, obejmujące analizy teoretyczne, symulacyjne oraz wyniki pomiarów w warunkach rzeczywistych, potwierdzają zasadność postawionych hipotez badawczych. Uzyskane rezultaty w sposób przekonujący uwiarygadniają główne tezy Autora dotyczące możliwości ograniczania zużycia energii w sieciach LPWAN przez świadome zarządzanie mechanizmami transmisji i nasłuchu, przy zachowaniu wymaganej niezawodności komunikacji.
2. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Oryginalność pracy polega na całościowym ujęciu problemu efektywności energetycznej LPWAN oraz na konsekwentnym powiązaniu modeli teoretycznych, analiz symulacyjnych i weryfikacji w kontekście rzeczywistych systemów telemetrycznych. Zaproponowane podejście ma charakter twórczy i wykracza poza standardowe analizy protokołowe spotykane w literaturze.
3. Zakres tematyczny rozprawy jest Autorowi bardzo dobrze znany. Świadczy o tym logiczna i spójna struktura pracy, trafny dobór literatury oraz umiejętność krytycznej analizy istniejących rozwiązań w zestawieniu z realnymi ograniczeniami sprzętowymi i środowiskowymi systemów IoT i smart meteringu.
4. Praca dowodzi zdolności Autora do samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Zaprezentowany tok badań – od sformułowania problemu, przez modelowanie i analizę, aż po implementację i interpretację wyników – potwierdza umiejętność samodzielnego rozwiązywania złożonych problemów badawczych i inżynierskich w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

Zgodnie z art. 186 ust. 1 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, rozprawa doktorska powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Na podstawie przeprowadzonej oceny stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Zbigniewa Łaskarzewskiego spełnia wymagania określone w obowiązujących przepisach oraz w Regulaminie prowadzenia postępowań w sprawie nadania stopnia doktora w Instytucie Informatyki Teoretycznej i Stosowanej Polskiej Akademii Nauk.

W związku z powyższym wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Jednocześnie pragnę zaznaczyć, że biorąc pod uwagę spójność koncepcji badawczej, skalę i jakość dorobku publikacyjnego Autora bezpośrednio związanego z tematyką rozprawy, a także udokumentowany związek wyników pracy z praktycznymi wdrożeniami systemów LPWAN, rozprawa może stanowić podstawę do rozważenia jej wyróżnienia w toku dalszego

postępowania, o ile spełnione zostaną warunki formalne określone w obowiązujących regulacjach, w szczególności w zakresie liczby i zgodności wniosków recenzentów.

dr hab. inż. Mikołaj Leszczuk, prof. AGH