

Dr hab. inż. Bartłomiej Płaczek, prof. UŚ
Uniwersytet Śląski w Katowicach
Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych
ul. Będzińska 39, 41-200 Sosnowiec
bartlomiej.placzek@us.edu.pl

Sosnowiec, 12.12.2025 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Artura Frankiewicza pt.
„Zwiększenie efektywności transmisji z wykorzystaniem węzłów pośrednich w sieciach LoRa”

Niniejszą recenzję opracowano na zlecenie Instytutu Informatyki Teoretycznej i Stosowanej Polskiej Akademii Nauk, 44-100 Gliwice, ul. Bałtycka 5, reprezentowanego przez Dyrektora IITiS PAN dra hab. inż. Krzysztofa Grochłę z dnia 15.10.2025 r.

1. Uwagi wstępne

Recenzowana rozprawa pana mgr inż. Artura Frankiewicza została przygotowana pod kierunkiem promotora dra hab. inż. Krzysztofa Grochli. Rozprawa napisana jest w języku polskim, składa się ze 126 stron, obejmuje 8 rozdziałów, wykaz stosowanych skrótów, spis rysunków oraz bibliografię zawierającą 106 pozycji literaturowych. Zawartość rozdziału 1 wprowadza podstawowe koncepcje Internetu Rzeczy i sieci LPWAN, uzasadnia podjęcie tematu, formułuje cel i tezę pracy, opisuje metodykę badań oraz przedstawia wkład naukowy Autora. Rozdział 2 zawiera przegląd stanu wiedzy dotyczący zastosowania węzłów pośrednich w sieciach bezprzewodowych oraz definiuje metryki oceny efektywności transmisji. W rozdziale 3 omówiono specyfikę technologii LoRa, w szczególności mechanizm modulacji, współczynnik rozpraszania oraz podstawowe czynniki wpływające na jakość transmisji. Rozdział 4 przedstawia wyniki badań wybranych aspektów funkcjonowania sieci LoRa, takich jak propagacja sygnału, ortogonalność, sterowanie mocą nadajnika i zużycie energii. W rozdziale 5 opisany został mechanizm retransmisji z wykorzystaniem węzłów pośrednich w sieci LoRaWAN oraz jego założenia implementacyjne. Rozdział 6 prezentuje symulator sieci LoRaWAN, obejmujący modele propagacji, kolizji i synchronizacji. Rozdział 7 zawiera wyniki symulacji dla różnych wariantów architektury sieci z uwzględnieniem pokrycia, kosztów i bilansu energetycznego. W rozdziale 8 podsumowano uzyskane wyniki i sformułowano wnioski końcowe.

2. Czy tematyka rozprawy jest aktualna i jak jest związana z rozwojem dyscypliny?

Tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej obejmuje zagadnienia związane z podniesieniem efektywności transmisji w sieciach LoRaWAN poprzez zastosowanie węzłów pośredniczących, stanowiących alternatywę dla klasycznej architektury opartej na komunikacji bezpośredniej pomiędzy urządzeniami końcowymi a bramką. Przedmiotem opisanych w rozprawie badań jest analiza wpływu mechanizmów retransmisji na zasięg, niezawodność, zużycie energii oraz koszty budowy i utrzymania infrastruktury sieci LPWAN,

w szczególności w zastosowaniach typu smart metering i systemach Internetu Rzeczy o dużej liczbie urządzeń.

Tematyka rozprawy jest aktualna, odnosi się do dynamicznie rozwijanego obszaru sieci Internetu Rzeczy (IoT) oraz technologii LPWAN, które stanowią obecnie podstawę dla postępu technologicznego w zakresie systemów pomiarowych, automatyki budynkowej i nowoczesnych usług telemetrycznych. W szczególności technologia LoRaWAN jest jedną z najczęściej wdrażanych platform komunikacyjnych w IoT, a jej dalszy rozwój wymaga zwiększenia niezawodności i efektywności transmisji w warunkach rosnącej liczby urządzeń, dużych odległości i ograniczeń energetycznych.

O aktualności podejmowanej w rozprawie problematyki badawczej świadczy fakt, że zagadnienia związane z poprawą zasięgu, niezawodności i efektywności transmisji w sieciach LoRaWAN, m. in. z wykorzystaniem węzłów pośredniczących, retransmisji oraz architektur wieloskokowych, stanowią obecnie temat coraz liczniejszych publikacji naukowych. W ostatnich latach obserwuje się wyraźny wzrost zainteresowania środowiska badawczego metodami umożliwiającymi rozszerzenie funkcjonalności LoRaWAN poza klasyczny model, czego przykładem są m.in. prace dotyczące architektur dedykowanych dla trudnych środowisk propagacyjnych, takich jak LLNRM - Loss Node Relay Mechanism, opracowany na potrzeby sieci miejskich oraz C-Mesh proponowany dla łączności na akwenach morskich. Problem poprawy niezawodności i pokrycia sieci LoRaWAN poprzez wykorzystanie węzłów pośrednich jest aktualny, intensywnie badany i stanowi naturalny kierunek rozwoju technologii LPWAN w zastosowaniach IoT.

Rozprawa pana mgr inż. Artura Frankiewicza wpisuje się w rozwój dyscypliny Informatyka techniczna i telekomunikacja, podejmując jeden z ważnych trendów współczesnych badań nad komunikacją bezprzewodową o niskim poborze mocy oraz odpowiadając na realne potrzeby zarówno praktyki inżynierskiej, jak i rozwoju wiedzy naukowej.

3. Jaki jest problem naukowy podejmowany przez Autora i czy został on trafnie sformułowany?

Problem naukowy podjęty w rozprawie dotyczy zwiększenia pokrycia oraz efektywności transmisji sieci LoRaWAN w warunkach ograniczeń charakterystycznych dla technologii LPWAN. Autor zakłada, że osiągnięcie tego celu jest możliwe dzięki zastosowaniu węzłów pośredniczących, które poprzez retransmisję pakietów mają potencjał poprawy zasięgu, niezawodności transmisji oraz bilansu energetycznego węzłów końcowych przy akceptowalnym koszcie infrastruktury. Sformułowany w ten sposób problem jest trafny i uzasadniony w kontekście aktualnych kierunków rozwoju technologii IoT. Formułując problem badawczy, Autor wskazuje na najistotniejsze ograniczenia istniejących metod wykorzystujących węzły pośredniczące, które zidentyfikował analizując aktualną literaturę i specyfikacje techniczne. W szczególności Autor zwraca uwagę na ograniczenia wynikające z zajętości medium, zwiększone ryzyko kolizji przy wielokrotnych retransmisjach, problemy skalowalności w środowiskach o dużej gęstości węzłów oraz na wzrost zużycia energii związany z długimi preambułami czy mechanizmami nasłuchu. Autor trafnie zauważa, że rozpatrywane w rozprawie mechanizmy retransmisji wymagają odpowiedniej jakości łącza między węzłem pośredniczącym a bramką sieciową oraz odpowiedniej koordynacji z algorytmami sterującymi parametrami łącza.

Dla tak zdefiniowanego problemu badawczego Autor sformułował odpowiednią tezę rozprawy, która zakłada, że zastosowanie węzłów pośredniczących w sieci LoRaWAN pozwala

na poprawę efektywności transmisji. Efektywność transmisji jest rozumiana jako poprawa zasięgu, niezawodności odbioru pakietów, bilansu energetycznego urządzeń oraz opłacalności infrastruktury, przy zachowaniu zgodności ze standardem i uwzględnieniu ograniczeń technologii LPWAN. Teza została jednoznacznie określona z uwzględnieniem mierzalnych kryteriów oceny (pokrycie, procent dostarczonych pakietów, koszty budowy sieci, zużycie energii) i warunków brzegowych (ograniczenia regulacyjne, właściwości modulacji LoRa, parametry warstwy MAC).

4. Czy Autor rozwiązał postawiony problem i czy wykorzystał w tym celu właściwe metody?

Autor w sposób metodyczny podjął w rozprawie próbę rozwiązania postawionego problemu badawczego. W tym celu przeprowadził ocenę porównawczą mechanizmu retransmisji z wykorzystaniem węzłów pośredniczących, który został opracowany we współautorstwie i opisany w zgłoszeniu patentowym EP4312388. W analizowanym przez Autora podejściu, węzeł pośredniczący pełni funkcję urządzenia przechwytyującego ramki wysyłane przez urządzenia końcowe znajdujące się poza stabilnym zasięgiem bramki. Odebrane ramki są następnie retransmitowane do bramki sieciowej. Okno czasowe i kanał retransmisji są w tej metodzie wybierane zgodnie z mechanizmem deterministyczno-losowym, który ogranicza prawdopodobieństwo kolizji. Zaproponowany sposób funkcjonowania węzła pośredniczącego wykorzystuje standardowe parametry transmisji LoRaWAN, dzięki czemu może być integrowany z istniejącą infrastrukturą.

Do przeprowadzenia oceny efektywności analizowanego rozwiązania Autor zastosował właściwe metody badawcze. Zbudował model symulacyjny sieci LoRaWAN, obejmujący cząstkowe modele propagacji sygnału, kolizji, protokołu MAC oraz parametrów modulacji LoRa. Model symulacyjny został użyty do porównania czterech scenariuszy, obejmujących klasyczną architekturę sieci LoRaWAN, sieć z węzłem pośredniczącym, wariant z zagęszczaniem bramek oraz wariant z węzłem LoRa-LTE. Autor przeprowadził również porównanie symulacyjne wariantów z węzłami pośredniczącymi bazujących na specyfikacji TS011 oraz zgłoszeniu patentowym EP4312388 i omówił zalety i ograniczenia obu rozwiązań. Rozpatrywane scenariusze stanowią dobrą podstawę do oceny potencjału zastosowania węzłów pośredniczących. Zaprezentowane w pracy wyniki symulacji wskazują, że analizowany mechanizm retransmisji może prowadzić do zauważalnej poprawy pokrycia i niezawodności transmisji w przypadkach, w których klasyczna architektura LoRaWAN wykazuje ograniczenia. W podrozdziale 7.2 Autor potwierdził tezę pracy, odnosząc uzyskane wyniki symulacyjne do warunków (1.1) - (1.5) sformułowanych w sekcji 1.3.1. Przedstawione wyniki wskazują, że w rozpatrywanym zestawie parametrów zastosowanie węzłów pośredniczących pozwala uzyskać pokrycie zbliżone do konfiguracji z większą liczbą bramek, niższe koszty budowy sieci oraz korzystniejszy bilans energetyczny w porównaniu z alternatywami. W związku z powyższym wyniki symulacji potwierdzają tezę w zakresie analizowanych scenariuszy.

Należy jednak zwrócić uwagę, że w pracy zaprezentowano jedynie częściową walidację symulatora, ograniczoną do jednej metryki (Daily read success) opisanej w podrozdziale 6.3. Nie przedstawiono porównania wyników symulacji z rzeczywistymi danymi pomiarowymi, mimo że takie dane zostały szczegółowo przedstawione w rozdziale 4. W pracy brakuje także opisu topologii referencyjnych, na które Autor powołuje się w kontekście walidacji. W konsekwencji nie wykazano jednoznacznie, że modele propagacji, kolizji i transmisji zaimplementowane w symulatorze odzwierciedlają zachowanie rzeczywistej sieci LoRaWAN, co ma wpływ na wiarygodność uzyskanych wyników symulacyjnych.

5. Na czym polega oryginalny wkład Autora w dyscyplinę?

Oryginalny wkład Autora w dyscyplinę Informatyka techniczna i telekomunikacja wynika przede wszystkim z przeprowadzenia wieloaspektowych badań porównawczych dotyczących efektywności transmisji w sieciach LoRaWAN z wykorzystaniem węzłów pośredniczących. Autor opracował i zrealizował zestaw eksperymentów symulacyjnych, obejmujący warianty bazujące na rozwiązaniach standardowych (TS011) i na podejściu opisanym we współautorskim zgłoszeniu patentowym EP4312388. Badania te obejmują analizę pokrycia, niezawodności transmisji, kosztów budowy infrastruktury oraz bilansu energetycznego, co pozwoliło na sformułowanie wartościowych wniosków dotyczących praktycznego zastosowania węzłów pośredniczących w sieciach LPWAN.

Na uwagę zasługuje również rozdział 4, w którym Autor przedstawił badania empiryczne obejmujące właściwości warstwy fizycznej LoRa (m.in. propagację, interferencje i zużycie energii), co stanowi dodatkowy element wkładu naukowego. Ponadto, jako potencjalny wkład w rozwój badań nad sieciami LoRaWAN, Autor przedstawia model propagacji sygnału, zbudowany w oparciu o dane pomiarowe i sieć neuronową (podrozdział 6.6). Wspomniany model ma na celu wierniejsze odwzorowanie zmienności kanału radiowego. Jak wskazuje Autor, opracowany model może stanowić narzędzie pozwalające na realistyczną ocenę parametrów transmisji w symulacjach sieci LPWAN. Choć koncepcja tego modelu jest interesująca, to jednak rozprawa nie przedstawia wyników badań, które potwierdzałyby, że zastosowanie modelu dynamicznego wnosi rzeczywistą wartość dla symulacji stanowiących podstawę weryfikacji tezy pracy. Autor nie wykorzystał tego modelu w głównej części eksperymentalnej, ani nie przeprowadził analizy porównawczej między modelem statycznym i dynamicznym, która mogłaby wykazać, że proponowane podejście pozwala uzyskać bardziej wiarygodne lub dokładniejsze oszacowania rozpatrywanych miar efektywności transmisji.

Mechanizm retransmisji określany w rozprawie jako „autorski” jest przedmiotem zgłoszenia patentowego, którego autorami są trzy osoby, w tym Autor i Promotor recenzowanej rozprawy. W podrozdziale 1.6 pan mgr Frankiewicz informuje, że był „głównym autorem przedmiotowego zgłoszenia patentowego”. Nie jest jasne jaki był wkład pozostałych osób w opracowanie rozwiązania będącego przedmiotem zgłoszenia patentowego. W związku z powyższym nie można jednoznacznie potwierdzić, że całościowe opracowanie tego rozwiązania jest oryginalnym, samodzielny wkładem pana mgr Frankiewicza w dyscyplinę. W rozprawie Autor koncentruje się przede wszystkim na analizie, modelowaniu i ewaluacji tego rozwiązania, jego wkład należy więc wiązać z przeprowadzeniem pogłębionych badań efektywności oraz analizą porównawczą opisanych architektur sieci LoRaWAN.

Za najważniejsze rezultaty rozprawy należy uznać wykazanie przez Autora, że:

- zastosowanie węzłów pośredniczących może znacząco zwiększyć pokrycie i niezawodność transmisji względem architektury bazowej LoRaWAN,
- węzły pośredniczące mogą stanowić efektywną kosztowo alternatywę dla zagęszczania infrastruktury bramek,
- rozwiązanie wykorzystujące mechanizm opisany w zgłoszeniu patentowym EP4312388 charakteryzuje się istotnie niższym zużyciem energii niż warianty oparte na specyfikacji TS011 lub retransmisji przez sieć komórkową.

Wkład Autora należy rozpatrywać łącznie z jego dorobkiem publikacyjnym przedstawionym w podrozdziale 1.6. Autor posiada merytorycznie spójny dorobek obejmujący publikacje poświęcone tematyce IoT, sieci LPWAN oraz transmisji LoRaWAN. Wystąpienia konferencyjne dotyczące węzłów pośredniczących pojawiają się w materiałach konferencji o zróżnicowanej

randze. Część z nich ma charakter krajowy lub lokalny. Pan mgr Artur Frankiewicz jest współautorem publikacji w czasopiśmie Sensors z listy ISI Master Journal List oraz czterech patentów. Dorobek Autora można uznać za adekwatny do etapu rozwoju naukowego.

Podsumowując, oryginalny wkład Autora w dyscyplinę polega przede wszystkim na wieloaspektowym zbadaniu efektywności zastosowania węzłów pośredniczących w sieciach LoRaWAN, krytycznej analizie scenariuszy alternatywnych oraz na przeprowadzeniu badań właściwości warstwy fizycznej LoRa. Wkład ten ma charakter głównie porównawczy, a jego wartość wynika z przeprowadzenia symulacji oraz sformułowania praktycznie istotnych wniosków, wspierających rozwój technologii LPWAN i systemów IoT.

6. Jakie jest znaczenie poznawcze oraz znaczenie praktyczne wkładu Autora?

Znaczenie poznawcze rozprawy wynika przede wszystkim z kompleksowej analizy efektywności zastosowania węzłów pośredniczących w sieciach LoRaWAN, przeprowadzonej w oparciu o własny model symulacyjny. Praca dostarcza opis mechanizmów retransmisji, zależności między parametrami warstwy fizycznej a skutecznością odbioru pakietów oraz wpływu architektury sieci na pokrycie i niezawodność transmisji w systemach LPWAN. Autor w sposób empiryczny wykazał, w jakim stopniu możliwe jest osiągnięcie poprawy niezawodności transmisji poprzez wprowadzenie węzłów pośredniczących. Wyniki przedstawione w rozprawie wzbogacają wiedzę dotyczącą skalowalności, efektywności energetycznej i ograniczeń technologii LoRaWAN i mogą stanowić punkt odniesienia dla dalszych prac badawczych.

Szczególnie istotne jest znaczenie praktyczne pracy, zwłaszcza z perspektywy projektowania i wdrażania sieci IoT o dużej skali, takich jak systemy licznikowe, sieci miejskie czy aplikacje telemetryczne. Wyniki analiz przedstawionych w rozprawie pokazują, że zastosowanie węzłów pośredniczących może znacząco poprawić pokrycie i niezawodność transmisji przy relatywnie niskim koszcie infrastruktury, stanowiąc atrakcyjną alternatywę dla zagęszczania sieci bramek. Wykazanie, że odpowiednio skonstruowany mechanizm retransmisji może obniżyć pobór energii urządzeń pośredniczących, ma praktyczne implikacje dla projektowania systemów o długiej żywotności i niskich kosztach eksploatacyjnych. Ponadto rozprawa identyfikuje istotne ograniczenia rozwiązań opartych na specyfikacji TS011, w szczególności w zakresie ryzyka kolizji i obciążenia energetycznego.

Recenzowana praca, choć jest oparta głównie na badaniach symulacyjnych, stanowi wartościowy materiał zarówno dla środowiska akademickiego, jak i dla praktyków odpowiedzialnych za rozwój infrastruktury IoT.

7. Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy Autora w zakresie nauk technicznych i w szczególowej wiedzy w odpowiadającym zakresowi badań?

Rozprawa świadczy o tym, że Autor posiada solidną i dobrze ugruntowaną wiedzę w zakresie nauk technicznych, w szczególności specjalistyczną wiedzę związaną z technologiami komunikacji bezprzewodowej oraz architekturą i mechanizmami działania sieci LoRaWAN. Przygotowując rozprawę Autor wykazał się dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy i specyfiki problemów charakterystycznych dla systemów IoT, m. in. dotyczących warstwy fizycznej LoRa, ograniczeń regulacyjnych, oraz metod zwiększania zasięgu sieci. Analiza techniczna, obejmująca szczegółowe omówienie modulacji LoRa, współczynnika rozpraszania, modeli propagacji oraz mechanizmów kolizji, jest poprawna merytorycznie i została przedstawiona w sposób świadczący o zrozumieniu szczegółowych zasad działania systemu. W zakresie wiedzy specjalistycznej Autor wykazuje umiejętność samodzielnego modelowania i analizy złożonych systemów teleinformatycznych. Opracowany przez niego symulator

stanowi narzędzie, które pozwoliło na zbadanie wpływu różnych parametrów na wydajność sieci LoRaWAN. Realizacja tej części pracy wskazuje na dobrą znajomość zasad symulacji dyskretnych, modelowania ruchu sieciowego, metod probabilistycznych i podstaw analizy statystycznej. Autor swobodnie posługuje się metrykami oceny systemów i jest w stanie powiązać je z właściwościami architektury sieci. Należy jednak zauważyć, że fragmenty pracy dotyczące walidacji symulatora są bardzo lakoniczne, co może świadczyć o pewnych brakach doświadczenia w prowadzeniu pełnego cyklu badań symulacyjnych, obejmujących weryfikację, walidację modeli oraz krytyczną ocenę wariantów alternatywnych.

Pomimo tego ograniczenia całość pracy dowodzi, że Autor posiada kompetencje niezbędne do prowadzenia badań w obszarze systemów IoT, dobrze rozumie specyfikę technologii LoRaWAN, a także potrafi zastosować metody analityczne i symulacyjne do rozwiązania problemu badawczego.

Rozprawa świadczy o wystarczająco szerokiej i specjalistycznej wiedzy Autora w dziedzinie nauk technicznych oraz o jego zdolności do samodzielnej analizy, modelowania i interpretacji wyników badań. Poziom wiedzy zaprezentowany w rozprawie należy ocenić jako adekwatny i wystarczający do ubiegania się o nadanie stopnia doktora.

8. Jakie są słabe strony rozprawy?

W rozprawie poruszono wiele wątków, z których część jest opisana bardzo skrótowo lub nieprecyzyjnie. Przykładem jest wspomniany już w niniejszej recenzji opis walidacji symulatora w rozdziale 6.3, który zawiera pewne wartości liczbowe i statystyczne dotyczące jednej wybranej metryki, jednak nie dostarcza czytelnikowi wystarczająco precyzyjnego opisu procesu walidacji. Innym przykładem jest sekcja 4.1.3, w której Autor prezentuje wyniki pomiarów terenowych obejmujących cztery warianty oznaczone na rysunku 4.2 jako „Scenariusz 1–4”. Scenariusze te nie zostały w pracy opisane. Brakuje informacji m. in. o tym które z konfiguracji odpowiadały warunkom LOS, a które NLOS oraz wyjaśnienia innych szczegółów np. dotyczących rodzaju zabudowy, przeszkód terenowych, czy odległości między węzłami. Rysunek 4.2 prezentuje wyniki bez odpowiedniego opisu w tekście pracy, który wyjaśniałby kontekst eksperymentalny.

Podobny problem dotyczy podrozdziału 2.2, w którym brakuje szerszego skomentowania diagramów prezentowanych na rysunkach 2.2 - 2.5. Podrozdział przedstawia kontekst technologiczny, ale nie dostarcza czytelnikowi wystarczająco precyzyjnego opisu, wyjaśniającego jak mechanizm węzłów pośredniczących działa w protokole Wize / Wireless M-Bus. Jest istotne, ponieważ rozdział 2 ma pełnić rolę przeglądu istniejących rozwiązań dla porównania z LoRaWAN.

W sekcji 4.2.3 Autor porównuje teoretyczne i empiryczne zależności RSSI i SNR oraz stwierdza, że „przyjmując dodatkowy, stały poziom interferencji w sieci [7 dB], model teoretyczny pokrywa się dość ściśle z obserwacjami”. Nie wyjaśnia jednak jak określono wartość 7 dB, w jaki sposób dokonano tego oszacowania, jaką zastosowano procedurę dopasowania modelu do danych pomiarowych.

W podrozdziale 4.4 Autor przedstawia analizę charakterystyk energetycznych urządzeń używanych do zdalnego opomiarowania liczników mediów. Brakuje jednak wprowadzenia w postaci prezentacji ogólnej architektury rozpatrywanych urządzeń. Autor przechodzi od razu do wylistowania danych dotyczących zużycia energii przez poszczególne elementy składowe.

W podrozdziale 5.1, opisując rysunek 5.3 wskazano, że do wyznaczenia prawdopodobieństwa całkowitej porażki retransmisji użyta została metoda Monte Carlo. Brakuje informacji o szczegółowej procedurze symulacji, liczbie prób i rozkładach losowanych zmiennych.

Opis mechanizmu retransmisji z wykorzystaniem predefiniowanych slotów czasowych w podrozdziale 5.2 jest nieprecyzyjny i nie pozwala czytelnikowi na zrozumienie zasady działania, bez sięgania do źródła tj. zgłoszenia patentowego EP4312388. Rysunek 5.5, który ma przedstawiać diagram sekwencji według zgłoszenia patentowego, jest niespójny z opisem oraz znacznie uproszczony względem oryginału. Na przykład w opisie odnoszącym się do tego rysunku Autor stwierdza, że „Strzałki skierowane w dół oznaczają późniejsze sygnały. Strzałki pionowe wychodzące z serwera sieciowego LoRaWAN NS1, bramki G1, przekaźnika R1 i urządzenia końcowego ED1 reprezentują źródła i cele transmisji”. Na rysunku 5.5 nie ma jednak takich strzałek.

W sekcji 5.2.3 pojawia się stwierdzenie, że synchronizacja „nie wymaga precyzyjnego zegara, lecz jedynie zgodności w skali minutowej”. Nie podano uzasadnienia tego założenia.

W podrozdziale 7.1 nieprecyzyjnie został opisany scenariusz „wyjściowy” symulacji. Autor informuje, że „w każdym uruchomieniu rozmieszczane jest losowo pięć urządzeń klasyfikowanych jako węzły słabe”. Nie jest jasne jak losowane są współrzędne położenia węzłów. Podobnie w przypadku „węzłów mocnych” określono jedynie, że „losowane są pozycje 50 urządzeń końcowych (ED), rozmieszczonych w odległości nieprzekraczającej 350 m od nadajnika”. Niewyjaśnione pozostają kwestie założeń dotyczących rozkładu prawdopodobieństwa i związanych z nim parametrów, które przyjęto w procedurze losowania współrzędnych węzłów. Autor zamiennie używa określeń odbiornik i nadajnik w odniesieniu do bramki sieciowej, co dodatkowo zaciemnia opis scenariusza symulacji. Przykłady uruchomień tego scenariusza przedstawiono na rysunku 7.1, jednak brakuje na nim graficznego rozróżnienia lokalizacji węzłów „słabych” i „mocnych” oraz oznaczenia lokalizacji bramki sieciowej.

Kolejną słabością rozprawy jest brak dyskusji dotyczącej dalszych kierunków badań. Autor podkreśla, że analizował rozwiązania oparte na węzłach pośredniczących, które były prezentowane w literaturze w momencie rozpoczęcia przygotowywania nad rozprawą. Są to publikacje z lat 2019 – 2021. Należałoby oczekiwać, że na etapie finalizacji prac nad rozprawą Autor podejmie próbę wskazania potencjalnych kierunków rozwoju rozwiązania z węzłami pośredniczącymi, uwzględniając wyniki własnych badań i najnowsze publikacje.

W pracy występują problemy z oznaczeniami i precyzją definicji. Na przykład, nie wiadomo czy P_{full} (str. 19) oznacza to samo co P_{UL} . Nie wyjaśniono znaczenia symboli 2RL(T) i 2RL(E) w tabeli 7.1. Część symboli użytych we wzorach (np. $N_{preamble}$, str. 29) nie została zdefiniowana w sposób jednoznaczny. W przypadku rysunku 5.4 występuje rozbieżność między opisem w tekście a oznaczeniami na schemacie (NS1, G1–G3 vs. LNS1, GW1–GW3). Stosowana jest niejednolita terminologia (np. węzeł pośredniczący określany jest również jako retransmiter, przekaźnik lub relay), co utrudnia odbiór prezentowanych treści.

Należy również wskazać szereg niespójności stylistycznych i edycyjnych. W pracy występują błędy językowe oraz literówki (np. „konfiguracja polegające” (str. 4), „W dalszej analizie” (str. 18), „zasilanych bakteryjnie” (str. 21), „Symbol LoRa składa się z 2^{SF} chipów” zamiast chirpów (str. 29), „bram dostępowcy” (str. 35). Obecne są powtórzenia fragmentów tekstu (np. pierwszego akapitu sekcji o retransmisji z podrozdziału 5.2, str. 25). Na stronie 57 powtórzony jest akapit rozpoczynający się od sformułowania „Specyfikacja retransmisji dla LoRaWAN wprowadza rolę węzła pośredniczącego RL”. Niekonsekwentnie stosowana jest forma bezosobowa (np. „Eksperymenty prowadzę...”). Uwagę zwraca nieuzasadnione stosowanie

anglicyzmów (np. „zastosowań outdoor”, „transceivery LoRa”, „desygnuje RL o niskim Pathloss (PL) z ED”), używanie kropki zamiast przecinka jako separatora dziesiętnego oraz niejednolite formatowanie wzorów (ramki wokół wzorów 6.9 i 6.10). Bibliografia zawiera niekompletny wpis (pozycja [61]). Tytuły niektórych podrozdziałów mogą wprowadzać w błąd, np. podrozdział 7.1, zatytułowany „Wartości przyjęte do symulacji” zawiera wyniki symulacji. Brakuje także doprecyzowania opisu rysunków wieloczęściowych (np. rysunek 7.1).

W tekście pracy brakuje odnośników i opisów do niektórych rysunków (np. rysunek 6.8). Na rysunku 7.9 brakuje oznaczenia lokalizacji bram dostępowych. W opisie tabeli 4.4 autor stwierdza, że „Pogrubioną czcionką zaznaczono podstawowe kanały LoRa...”, jednak w rzeczywistości nie zastosował takiego oznaczenia.

Przedstawione powyżej uwagi krytyczne nie negują pozytywnej oceny merytorycznej recenzowanej rozprawy.

9. Wnioski końcowe recenzji

Pan mgr inż. Artur Frankiewicz w rozprawie doktorskiej pt. „Zwiększenie efektywności transmisji z wykorzystaniem węzłów pośrednich w sieciach LoRa” przedstawił oryginalne wyniki własnych badań symulacyjnych. Recenzowana rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Autora w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja. Pan Artur Frankiewicz wykazał się również umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, w szczególności w zakresie badań nad metodami transmisji danych w sieciach bezprzewodowych. W związku z powyższym, opiniowana rozprawa spełnia wymagania obowiązujących przepisów prawa. Wnoszę o jej dopuszczenie do dalszych etapów przewodu doktorskiego.