

### **Recenzja rozprawy doktorskiej**

Pana mgr. inż. Artura Frankiewicza

pt. Zwiększenie efektywności transmisji z wykorzystaniem węzłów pośrednich w sieciach LoRa

Niniejsza recenzja została sporządzona na podstawie Uchwały Rady Naukowej IITiS PAN nr RN/23/2025 z dnia 30.09.2025 roku na mocy której zostałem wyznaczony na recenzenta rozprawy Pana mgr. inż. Artura Frankiewicza. Rozprawę otrzymałem w wersji elektronicznej w dniu 16.10.2025 wraz z wytycznymi dla recenzentów.

#### **1. Problem badawczy i jego znaczenie**

Praca podnosi problem opracowania efektywnej metody retransmisji danych przez węzły sieci radiowej (ang. *end node* - *ED*) działającej z wykorzystaniem technologii radiowej LoRa i stosu protokołów LoRaWAN. Celem praktycznym opracowania takiej metody jest zwiększenie zasięgu sieci LoRaWAN bez konieczności dokładania dodatkowych bram (ang. *Gateway* - *GW*), które pośredniczą w przekazywaniu wiadomości pomiędzy siecią radiową LoRa i siecią Internet. Korzyścią z rozwiązania jest możliwość wykorzystania mniejszej liczby bram, które nie dość że są złożonymi i relatywnie drogimi urządzeniami, to dodatkowo wymagają stałego źródła zasilania. Znaczenie praktyczne rozwiązania jest duże ponieważ może ono prowadzić do istotnego ograniczenia kosztów instalacji i utrzymania rozległych sieci LoRaWAN. Wyzwaniem przy opracowywaniu metod retransmisji jest utrzymanie w ryzach kosztu energetycznego ponoszonego przez urządzenia końcowe realizujące dodatkowe zadanie retransmisji, który wynika z koniecznością wydatkowania dodatkowej energii na odbieranie i ponowne wysyłanie retransmitowanych wiadomości.

Podejmowany problem ma istotne znaczenie praktyczne i mocny aspekt badawczy dotyczący optymalizacji sieci pod kątem liczby elementów i kosztów infrastruktury, kosztów utrzymania urządzeń i efektywności energetycznej, która przekłada się bezpośrednio na czas niezawodnego i bezobsługowego działania.

W momencie, gdy doktorant rozpoczynał swoje prace w systemach wykorzystujących LoRaWAN nie było ustandaryzowanych możliwości retransmisji danych przez urządzenia końcowe a cała komunikacja realizowana była w topologii gwiazdy – urządzenia końcowe przesyłały informacje bezpośrednio do bram, które poprzez sieć Internet przekazywały je do serwerów LoRaWAN. Możliwość retransmisji została oficjalnie wprowadzona do standardu LoRaWAN w drugiej połowie 2022 r.

Jednocześnie warto zauważyć, że na przełomie pierwszego dziesięciolecia XXI wieku w literaturze pojawiało się dużo prac analizujących różne topologie sieci, metody retransmisji danych i tworzenia efektywnych protokołów routingu dla bezprzewodowych sieci czujników (ang. *wireless sensor networks*).

Elementem tych prac były badania dotyczące m.in. efektywności energetycznej w przypadku transmisji z wykorzystaniem różnej liczby węzłów pośredniczących pomiędzy urządzeniem końcowym a stacją bazową. Ogólny wniosek był taki, że retransmisje, choć pozwalają zwiększyć efektywny zasięg sieci, istotnie wpływają na złożoność systemu komunikacji, koszty energetyczne i czas funkcjonowania sieci. Efektem ówczesnych badań było m.in. zaproponowanie protokołu DASH-7, który był dedykowany dla urządzeń Internetu Rzeczy (ang. *Internet of Things – IoT*), i pozwalał na przesyłanie danych z pojedynczą retransmisją. Metoda wykorzystywana w DASH-7 różni się jednak od metody zaproponowanej przez doktoranta.

## 2. Motywacja i cel rozprawy

Motywacją doktoranta do prowadzenia badań była jego codzienna praca z dużymi sieciami LoRaWAN wykorzystywanymi m.in. do gromadzenia pomiarów z liczników zużycia wody na terenach miejskich. W obszarach tych bardzo często dochodzi do sytuacji w której urządzenia końcowe umieszczone są w miejscach o ograniczonym zasięgu radiowym (wnętrza budynków, piwnice), a rozmieszczanie bram podlega szeregu ograniczeniom i każdorazowo wymaga doprowadzenia do nich zasilania i możliwości dostępu do Internetu. W konsekwencji dokładanie dodatkowych bram w celu zapewnienia właściwego pokrycia obszaru jest trudne z praktycznego punktu widzenia i nieefektywne finansowo.

Doktorant skupił się na bardzo konkretnym scenariuszu działania sieci, w którym urządzenia końcowe dokonują pomiarów i cyklicznie, w ustalonych odstępach czasu, wysyłają dane pomiarowe do centralnych serwerów. Bazując na założeniu synchronizacji zegarów urządzeń końcowego i retransmitującego, oraz wiedzy na temat wszystkich urządzeń końcowych i znajomości ich położenia, doktorant uzyskał bardzo specyficzną sytuację, która pozwoliła mu zaproponować efektywne rozwiązanie.

Przyjęte założenia były podyktowane konkretnym problemem praktycznym, który doktorant adresował. O ile praktyczna wartość takiego podejścia jest duża, to przyjęte założenia ograniczają istotnie możliwe obszary zastosowań zaproponowanej metody.

## 3. Układ i zawartość pracy

Praca doktorska składa się z 8 rozdziałów, spisu literatury i rysunków. Jej układ jest właściwy a kolejne rozdziały dobrze wprowadzają w podejmowaną tematykę, prezentują podejmowany problem badawczy, opisują autorskie rozwiązanie doktoranta, przeprowadzone badania, uzyskane wyniki oraz wyciągnięte wnioski. Rozdział pierwszy obszernie opisuje cel, zakres i hipotezy stawiane przez doktoranta. W rozdziale drugim szczegółowo przedstawiono przegląd istniejących rozwiązań i prac poświęconych tematyce retransmisji informacji w rozległych sieciach radiowych. Doktorant zdefiniował również założenia dla prowadzonych badań. Rozdział trzeci skupia się całkowicie na sieci LoRa i stosie protokołów LoRaWAN opisując je dość szczegółowo. Analiza wybranych aspektów tych technologii została przedstawiona w rozdziale czwartym. Jednym z najistotniejszych rozdziałów pracy jest rozdział 5 w którym doktorant przedstawia swoje autorskie rozwiązanie postawionego problemu badawczego. W rozdziale 6 przedstawiono opracowany symulator sieci LoRa/LoRaWAN, który został wykorzystany do badań i oceny zaproponowanego rozwiązania. Wyniki przeprowadzonych badań zostały przedstawione w rozdziale 7 a podsumowanie zrealizowanych prac znajduje się w ostatnim, ósmym, rozdziale pracy.

#### 4. Wkład Autora

Doktorant w rozprawie podejmuje się problemu zapewnienia skutecznego i efektywnego pokrycia zasięgiem radiowym określonego obszaru. Podejmowany problem ma istotny aspekt praktyczny i wiąże się z wykorzystaniem technologii radiowych do zdalnego odczytywania liczników mediów na dużym obszarze. Autor słusznie zauważa, że problem taki ma swoją specyfikę polegającą na statyczności elementów sieci, znajomości ich rozmieszczenia na całym obszarze, gromadzenia pomiarów wartości wolnozmiennych i kilkukrotnym ich transmitowaniu. Wykorzystanie typowych mechanizmów retransmisji, w tym ustandaryzowanego dla sieci LoRaWAN, jest nieefektywne energetycznie, dlatego doktorant zaproponował własne rozwiązanie, które dzięki wykorzystaniu specyfiki problemu pozwala osiągnąć lepsze rezultaty.

Doktorant zaproponował rozwiązanie polegające na wykorzystaniu węzłów pośredniczących, które oprócz realizacji funkcji pomiarowych mogą realizować dodatkowe zadanie retransmisji wiadomości od innych urządzeń końcowych. Rozwiązane zostało opracowane przy założeniu, że urządzenie końcowe i retransmitujące mogą utrzymać wzajemną synchronizację komunikacji w kilku godzinnych odstępach czasu. Synchronizacja daje retransmitterowi informację w których momentach czasu ma on nasłuchiwać na transmisję od urządzenia końcowego. Dzięki temu zarówno urządzenie końcowe jak i retransmitter nie muszą nasłuchiwać / nadawać przez dłuższe okresy czasu, co powoduje, że koszt energetyczny retransmisji jest niski. Zaproponowane rozwiązanie działa pod warunkiem zagwarantowania, że synchronizację da się utrzymać pomimo różnych parametrów pracy zegarów w poszczególnych urządzeniach i różnych warunków w których one funkcjonują. Weryfikując swoje założenia doktorant przeprowadził szereg badań wpływu różnych parametrów na działanie urządzeń, m.in. przeanalizował wpływ temperatury na stabilność zegarów. Aby zapewnić synchronizację i reagować na jej utratę, doktorant zaproponował wykorzystanie mechanizmu okien o zmiennych rozmiarach, które zostały opisane w pracy [Górawski2021], której doktorant jest jednym ze współautorów.

Oprócz propozycji rozwiązania problemu retransmisji w sieci LoRa doktorant przeprowadził szereg eksperymentów, których celem było zrozumienie wpływu różnych zjawisk na funkcjonowanie urządzeń końcowych i sieci LoRaWAN. W badaniach wykorzystał zarówno pomiary rzeczywistych urządzeń, w tym rozległych sieci LoRaWAN złożonych z wielu urządzeń końcowych, oraz symulacje komputerowe. Doktorant m.in. przeprowadził interesujące badania wpływu temperatury, rozrzutu produkcyjnego kosztów energetycznych, skuteczności odbioru na wielu kanałach, czy poprawnego odbierania pakietu radiowego LoRa dla różnych mocy sygnału. Wyniki badań posłużyły do opracowania metody retransmisji, która została następnie przebadana symulacyjnie i porównana z innymi rozwiązaniami referencyjnymi, pokazując przewagę zaproponowanego rozwiązania pod kątem kosztu energetycznego oraz nakładów finansowych związanych z poprawą pokrycia sieci.

#### 5. Uwagi krytyczne i komentarze

Praca doktorska jest generalnie dobrze napisana i oddaje zakres zrealizowanych prac. Niestety najważniejsze elementy pracy, rozdział 5 i 7 opisujące m.in. zaproponowany mechanizm retransmisji i porównanie zaproponowanej metody z innymi, są w mojej ocenie jednymi ze słabszych. W rozdziale 5 pierwsze zastrzeżenie budzi wykorzystanie obszernych fragmentów zgłoszenia patentowego (którego doktorant jest współautorem), które są obarczone wieloma niedoskonałościami edytorskimi – zmiana języka pracy w rozdziale 5.2.1 i niezgodność rysunku 5.5. z opisem w treści pracy, to tylko niektóre elementy, które utrudniają zrozumienie działania proponowanego rozwiązania. W mojej ocenie, takie powielenie treści zgłoszenia patentowego świadczy albo o pośpiechu w przygotowaniu pracy, albo braku dbałości o jej końcowy styl. Jakość tego rozdziału odbiega od oczekiwań stawianych pracy doktorskiej. Podobnie zaskakujące są

błędy redakcyjne dotyczące bibliografii: nieuporządkowanie (kolejność pozycji), brak jednolitego formatu opisów (różne sposoby podawania autorów), brak kompletnych opisów przy niektórych pozycjach (np. [61]) oraz błędy w cytowaniu niektórych publikacji – w pracach [58], [61] i [67] niepoprawnie podano współautorów pracy co jest błędem, który nie powinien się zdarzyć w pracy doktorskiej. W przypadku pozycji [58, 67], których recenzent jest współautorem, stwierdzenie błędów jest natychmiastowe, pytanie czy podobnych błędów nie ma w przypadku pozostałych pozycji literaturowych?

W ramach testów proponowanego rozwiązania doktorant przeprowadził symulacje różnych konfiguracji sieci. Przyjmując założenia dla symulacji doktorant wskazał, że „statystyki jakości usług gromadzono po upływie fazy inicjalnej” która trwała 4 dni (8 okien zgłoszeniowych). Dalej autor pisze, że „Dobry czas jest wystarczający dla ED [urządzenie końcowe] na zestawienie komunikacji z ED.” Oznacza to, że doktorant nie bierze pod uwagę działań podejmowanych przez węzły końcowe, gdy te wymieniają wiadomości związane z wyborem węzłów retransmitujących (np. wymiany wiadomości Relay Join Request, Relay Join Accept, itp.) Działania te występują tylko w przypadku konfiguracji z węzłami retransmitującymi, więc ich pominięcie wpływa na korzyść tych scenariuszy dając im przewagę nad scenariuszem z użyciem dodatkowych bram, w których działania takie nie są w ogóle realizowane. W pracy nie znalazłem informacji w jaki sposób pominięcie „fazy inicjalnej” wpływa na uzyskiwane wyniki (np. koszt energetyczny) dla poszczególnych scenariuszy.

Testowa konfiguracja bazowa składała się z 50 urządzeń końcowych i jednej bramy i była porównywana z konfiguracjami, w których dodawano dodatkowe bramy, przekaźniki LoRa-LTE oraz węzły retransmitujące działające zgodnie z metodą zaproponowaną przez doktoranta. Opisując konfiguracje doktorant nie wyjaśnia na jakiej podstawie podjął decyzję o sposobie rozmieszczenia bram i węzłów retransmitujących, dlaczego przyjął że 10% węzłów, to tzw. „węzły słabe”, czyli takie, które wymagają dodatkowej bramy lub węzłów retransmitujących, aby przesyłane przez nie informacje skutecznie dotarły do serwerów LoRaWAN. Istotne jest również pytanie o wpływ tych parametrów na skuteczność proponowanego rozwiązania – czy w sieciach z inną liczbą „węzłów słabych”, z bramą rozmieszczoną inaczej (np. centralnie) na obszarze, wyniki będą zbliżone czy istotnie różne?

Podobnie w pracy pojawia się informacja, że jeden węzeł retransmitujący przekazywał komunikaty od 2-3 węzłów końcowych („słabych”). W pracy nie znalazłem analizy w jaki sposób liczba węzłów „słabych” przypadających na jeden węzeł retransmitujący wpływa na skuteczność całego rozwiązania. Czy i jak można balansować obciążenie retransmiterów?

Na stronie 98 doktorant opisuje sytuację po dodaniu dodatkowej bramy w punkcie (150,250) a później kolejnej w punkcie (250,750), nie wyjaśniając w jaki sposób zapadła decyzja o takiej lokalizacji i czy przypadkiem dodanie dodatkowej bramy nie powinno skutkować rozważeniem zmiany położenia bram(y), która już istniała.

Opisując rozmieszczenie węzłów pośrednich (strona 99) doktorant pisze: „W tym celu rozmieszczono dwa urządzenia RL [węzły retransmitujące], analogicznie jak bramy dostępowe w punktach R1 oraz R2.”, ale w zdaniu kolejnym podaje inne współrzędne niż wspomnianych bram dostępowych – (300, 250) i (300, 650). Podobnie jak w przypadku bram nie jest jasne jak wybrano te punkty i czy nie ma innych punktów, które lepiej nadawałyby się na lokalizację retransmitera.

W tabeli 7.1 zestawiającej wyniki symulacji, brakuje symulacji dla 2 bram, SF=12 i liczby retransmisji ramek  $N=2$ , która może mieć prawdopodobieństwo dostarczenia zgłoszenia dziennego zbliżone do rozwiązań wykorzystujących 2 węzły retransmitujące, przy istotnie niższym narzucie inwestycyjnym (niż w przypadku użycia 3 bram) i niskim koszcie energetycznym.

W tej samej tabeli doktorant przedstawił koszt energetyczny działania retransmitera (ostatnia kolumna), który uwzględnia tylko koszty związane z pracą w trybie uśpienia, odbierania i transmisji związanych z retransmisją (wzór (2.5) strona 21). W koszcie działania retransmitera nie uwzględniono faktu,

że jest on też regularnym urządzeniem końcowym (ED), przez co ponosi również koszt transmisji własnych danych pomiarowych. Dodatkowo, przyjmując wcześniejsze założenie o 2-3 „słabych węzłach” których dane są retransmitowane przez jeden węzeł pośredniczący oznacza to, że koszt energetyczny ponoszony przez taki węzeł jest kilka razy większy niż węzłów końcowych. W pracy nie znalazłem dyskusji jak to wpływa na czas działania takiego retransmitera (poza założeniem, że bateria ma mu wystarczyć na 5 lat pracy), jak wpływa na czas działania całej sieci przez który zapewnione jest pokrycie obszaru i wysoka skuteczność dostarczania danych, i jak można ten czas maksymalizować.

Niektóre z wniosków doktoranta wydają się oczywiste. Przykładowo na stronie 96, doktorant pisze, że „Symulacje z włączonym mechanizmem ADR (dla topologii przedstawionej na rys. 7.6) wykazały, że choć mechanizm ten wyraźnie redukuje zużycie energii przez urządzenia końcowe, nie prowadzi do poprawy całkowitej skuteczności dziennej” co wydaje się wnioskiem oczywistym, ponieważ celem mechanizmu ADR jest zmniejszenie kosztu energetycznego przy zachowaniu (a nie poprawie) skuteczności transmisji danych. Badania doktoranta wydają się po prostu potwierdzać cel dla których w LoRaWAN zaproponowano stosowanie mechanizmu ADR.

## 6. Konkluzja

Pomimo przedstawionych uwag w mojej ocenie przedstawiona rozprawa **spełnia ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim**, w szczególności doktorant:

- zaprezentował swoją ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja,
- podjął się aktualnego tematu i zaproponował rozwiązanie problemu z obszaru dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja,
- zaprezentował swoją umiejętność prowadzenia pracy naukowej, stawiania hipotez badawczych, dobierania metod badawczych i prowadzenia procesu badawczego zmierzającego do ich weryfikacji,
- wykorzystując warsztat naukowy zaprezentował oryginalne rozwiązanie problemu naukowego o charakterze praktycznym, proponując metodę, która może być zastosowana w rzeczywistym środowisku przemysłowym.

Mając powyższe na uwadze stwierdzam, że doktorant **wykazał się wiedzą i umiejętnościami wymaganymi do uzyskania stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja**, zgodnie z obowiązującymi przepisami (ustawa Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce Dz.U.2024, poz. 1571). W związku z tym **wnioskuję o dopuszczenie doktoranta mgr. inż. Artura Frankiewicza do dalszych etapów przewodu doktorskiego, w tym publicznej obrony jego pracy.**

dr hab. inż. Maciej Nikodem