

Warszawa, 21 grudnia 2024 r.

Dr hab. inż. Halina Tarasiuk  
Instytut Telekomunikacji  
Politechnika Warszawska  
ul. Nowowiejska 15/19  
00-665 Warszawa

## **Recenzja rozprawy doktorskiej dla Rady Naukowej IITiS PAN**

Tytuł rozprawy: Dobór lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa oraz ich wpływ na efektywność sieci

Autor rozprawy: mgr Anna Strzoda

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

Promotor pomocniczy: dr inż. Konrad Połys

### **1. Czy tematyka rozprawy jest aktualna i jak jest związana z rozwojem dyscypliny?**

Temat rozprawy dotyczy sieci Internetu Rzeczy (IoT), w szczególności jest związany z zapewnieniem jak najlepszej transmisji danych w sieciach z technologią LoRa i węzłami pośredniczącymi typu relay, przy uwzględnieniu efektywności energetycznej. W rozprawie sformułowano i udowodniono następującą tezę rozprawy: „Odpowiedni dobór lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa poprawia efektywność energetyczną sieci.”

Tematyka rozprawy jest aktualna i ściśle związana z rozwojem dyscypliny. W rozprawie dokonano szczegółowej analizy stanu sztuki, stanu prac organizacji standaryzacyjnej LoRa Alliance, oraz oryginalnej analizy dostępnych danych pomiarowych z dwóch środowisk miejskich sieci LoRa, które posłużyły w sformułowaniu problemów do rozwiązania.

Tematyka rozprawy i proponowane rozwiązania mogą mieć zastosowanie dla efektywnego rozmieszczenia węzłów pośrednich w sieci IoT w rzeczywistych środowiskach.

### **2. Jaki jest problem naukowy podejmowany przez Autora i czy został on trafnie sformułowany?**

Problem sformułowany w rozprawie dotyczy efektywnego rozmieszczenia węzłów pośrednich dla polepszenia jakości transmisji danych w sieci LoRa na podstawie analizy zużycia energetycznego dostępnych urządzeń oraz współczynnika rozpraszania SF. W mojej ocenie, problem został trafnie sformułowany.

### **3. Czy Autor rozwiązał postawiony problem i czy wykorzystał w tym celu właściwe metody?**

Autor rozwiązał problem sformułowany w rozprawie. W rozprawie zaproponowano oryginalną analizę i oryginalne zastosowanie danych pomiarowych ze środowisk zurbanizowanych, co stanowiło podstawę do sformułowania problemów szczegółowych, wyboru sposobów generowania topologii testowych, oraz opracowania algorytmów bazujących na modelu grafowym dla znalezienia najlepszych rozwiązań dla rozmieszczenie węzłów pośrednich typu relay.

W rozprawie wykorzystano metody heurystyczne, które stanowiły podstawę dla znalezienia kompleksowego rozwiązania, polegającego na cyklicznej aktualizacji lokalizacji węzłów pośrednich na podstawie iteracyjnej metody adaptacyjnej. W obu przypadkach chodzi o znalezienie rozwiązania pozwalającego na efektywne zużycie energii na podstawie informacji o bieżącym zużyciu energii przez węzły. W celu potwierdzenia skuteczności zaproponowanych algorytmów zastosowano symulację zdarzeniową i modele symulacyjne narzędzia OMNeT++, które rozbudowano o niezbędne komponenty. Wykorzystano zarówno topologie ze środowisk pomiarowych, jak i topologie losowe z rozkładem równomiernym węzłów.

W rozprawie przeprowadzono zarówno dogłębną analizę danych pomiarowych ze środowisk miejskich, jak i wnikliwe badania symulacyjne. Należy podkreślić, że opis problemów badawczych, założeń i proponowanych algorytmów jest na bardzo wysokim poziomie szczegółowości. Pozwala tym samym na możliwość dokładnego śledzenia toku myślenia Autora. Uzyskane wyniki symulacyjne wskazują na skuteczność proponowanych rozwiązań. Tym samym należy stwierdzić, że sformułowanie problemu i dobór metod do jego rozwiązania są prawidłowe i właściwe.

### **4. Na czym polega oryginalny wkład Autora w dyscyplinę?**

Oryginalny wkład Autora w dyscyplinę polega na zaproponowaniu następujących oryginalnych rozwiązań:

- Zastosowanie danych pomiarowych z dwóch miejskich środowisk IoT dla szczegółowej analizy problemu związanego z jakością transmisji danych w sieciach LoRa.
- Zaproponowanie metody heurystycznej dla znalezienia najlepszej lokalizacji węzłów pośrednich typu relay dla zastosowania sieci LoRa w sieciach rozległych.
- Zaproponowanie oryginalnego kompleksowego rozwiązania polegającego na cyklicznym sprawdzaniu energetycznego stanu węzłów i zastosowaniu adaptacyjnej metody lokalizacji węzłów pośrednich.

### **5. Jakie jest znaczenie poznawcze oraz znaczenie praktyczne wkładu Autora?**

Znaczenie poznawcze wkładu Autora polega na zastosowaniu oryginalnych metod rozwiązania sformułowanego problemu znalezienia lokalizacji węzłów pośrednich w sieci LoRa dla zapewnienia jakości przekazu danych, z uwzględnieniem efektywności energetycznej. Znaczenie poznawcze wiąże się ściśle ze znaczeniem praktycznym, gdyż problem został

sformułowany i rozwiązany z uwzględnieniem rzeczywistych środowisk IoT dla dwóch miast. Przeprowadzone badania symulacyjne, które uwzględniają rzeczywiste rozmieszczenie węzłów IoT, oraz problemy z transmisją wynikające nie tylko z odległości między węzłami, pozwalają na stwierdzenie, że aspekt praktycznego zastosowania uzyskanych wyników jest bardzo duży. Jednocześnie rozwój zastosowań sieci IoT w różnych środowiskach, jak np. kopalnie, studzienki miejskie, które mogą charakteryzować się utrudnieniami w transmisji wynikającymi z lokalizacji, wskazuje na potrzebę prowadzonych badań, jak to przedstawiono w rozprawie.

#### **6. Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy Autora w zakresie nauk technicznych i szczegółowej wiedzy w odpowiadającej zakresowi badań?**

Rozprawa świadczy o bardzo dobrej wiedzy Autora w zakresie nauk technicznych, w szczególności na temat standardów dla sieci IoT, środowisk radiowych, a także metod optymalizacji, metodologii prowadzenia pomiarów i analizy ich wyników, zastosowaniu danych pomiarowych z rzeczywistego środowiska w badaniach symulacyjnych. Autor wykazał się doskonałą umiejętnością formułowania problemów badawczych, opisu zastosowanych metod poprzez opis przykładów zastosowania, które doskonale obrazują istotę problemu, a także analizę uzyskanych wyników pośrednich dla znalezienia kompleksowych rozwiązań formułowanego problemu.

#### **7. Jakie są słabe strony rozprawy?**

Nie dostrzegam słabych stron rozprawy. Można jedynie oczekiwać bardziej dokładnego wyjaśnienia dwóch kwestii:

- Dlaczego dla opisu modelu zużycia energii wybrano konkretnie model z literatury [66]? Nie umieszczono szczegółowego uzasadnienia w rozdziale 2 dotyczącym stanu wiedzy.
- Szczegółowej metodyki pomiarów dla środowisk miejskich, które stanowią podstawę analizy przeprowadzonej w rozdziale 3.
- 

#### **8. Ocena układu rozprawy doktorskiej, w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych**

Rozprawa doktorska składa się z 7 rozdziałów, zawiera 145 strony. Układ rozprawy doktorskiej jest bardzo czytelny.

Rozdział 1 rozprawy zawiera wprowadzenie do zagadnień sieci IoT, LPWAN, LoRa, oraz sformułowanie tezy rozprawy.

Rozdział 2 przedstawia stan wiedzy w komunikacji wielkomiejskiej w sieciach LPWAN, stan wiedzy na temat technik LoRa LoRaWAN, analizę literatury, a także wybór metod dla dalszej części pracy, czyli modelu grafowego do opisu problemu rozmieszczenia węzłów w sieci LoRa oraz sposobu oceny efektywności energetycznej węzłów.

Rozdział 3 opisuje analizę efektywności sieci LoRa, m.in. na podstawie szczegółowej analizy oryginalnych danych pomiarowych dwóch rozległych sieci miejskich, popartej licznymi ilustracjami.

Rozdział 4 opisuje środowisko symulacyjne oraz szczegółowe modele symulacyjne zastosowane w rozprawie.

Rozdział 5 zawiera oryginalne rozwiązanie zaproponowane w rozprawie polegające na zastosowaniu metody heurystycznej dla polepszenia efektywności energetycznej dla przyporządkowania węzłów pośrednich w sieci LoRa. Rozdział zawiera przykłady obrazujące zastosowanie proponowanej metody, oraz wyniki symulacyjne wraz z ich dogłębną analizą, w tym analizą złożoności obliczeniowej dla proponowanego rozwiązania.

Rozdział 6 przedstawia propozycję metody adaptacyjnej dla kompleksowego rozwiązania cyklicznego sprawdzania stanu węzłów i propozycji węzłów pośrednich dla sformułowanego problemu. Rozdział zawiera opis proponowanej metody, wyniki symulacyjne oraz ich analizę. Uzyskane wyniki wskazują na skuteczność zaproponowanej metody, opisaną poprzez zaproponowane w pracy metryki jej oceny.

Rozdział 7 stanowi syntetyczne podsumowanie rozprawy.

Praca jest napisana bardzo starannie. Znaleziono jedynie kilka drobnych błędów edycyjnych polegających m.in. na powtórzeniu wyrazu, które nie mają wpływu na jakość pracy.

## 9. Podsumowanie

Rozprawa proponuje oryginalne rozwiązania dla efektywnej lokalizacji węzłów pośrednich w sieciach miejskich LoRa, uwzględnia szereg aspektów związanych z rzeczywistym środowiskiem sieci IoT, które to aspekty wynikają z dogłębnej oryginalnej analizy rzeczywistych danych pomiarowych uzyskanych dla pomiarów w długim czasie, w różnych porach roku. Uzyskane wyniki rozprawy udowodniły tezę sformułowaną w rozprawie. Zastosowane metody realizacji pracy oraz publikacje wyników rozprawy wskazują na bardzo dobre przygotowanie Autora do prowadzenia samodzielnych badań. **Podsumowując, w mojej ocenie rozprawa spełnia wymagania odnoszące się do obowiązujących przepisów w zakresie prac doktorskich.**

Halina Tonańska