

Politechnika Poznańska
Wydział Informatyki i Telekomunikacji,
Instytut Sieci Teleinformatycznych

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

opracowana na zlecenie Instytutu Informatyki Teoretycznej i Stosowanej Polskiej Akademii Nauk,
reprezentowanego przez Dyrektora IITiS PAN dr hab. inż. Krzysztofa Grochłę

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

Autor rozprawy: **mgr Anna STRZODA**

Promotor: dr hab. inż. Krzysztof Grochola

Promotor pomocniczy: dr inż. Konrad Połys

Dziedzina: nauki inżyniersko-techniczne

Dyscyplina: informatyka techniczna i telekomunikacja

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

W ostatnich latach można zaobserwować wyraźny wzrost zainteresowania rozwiązaniami zapewniającymi komunikację bezprzewodową urządzeń zasilanych przez ograniczone źródła energii. Widoczne jest to w tematyce podejmowanych problemów badawczych, w działaniach organizacji standaryzacyjnych oraz w pracach implementacyjnych.

Tematyka rozprawy doktorskiej jest związana z zagadnieniami dotyczącymi komunikacji wieloskokowej w niskoemisyjnych sieciach rozległych (LPWAN). Autorka rozprawy opracowała nowe metody wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w bezprzewodowych sieciach dalekiego zasięgu (LoRaWAN). Zaproponowane metody mają na celu minimalizację zużycia energii w sieci oraz maksymalizację czasu wykorzystania baterii urządzeń końcowych, a więc maksymalne wydłużenie czasu działania sieci LoRaWAN, co jest szczególnie ważne w rozwiązaniach Internetu Rzeczy (IoT). Zaproponowane metody składają się z procedur, spostrzeżeń i kryteriów biorących pod uwagę parametry i cechy środowiska LoRa. Doktorantka zaproponowała grupę metod lokalizacji węzłów pośredniczących rozpoczynając od

lokalizacji pojedynczych węzłów pośredniczących dedykowanych pojedynczym urządzeniom końcowym o ograniczonej łączności, kolejno ograniczając liczbę urządzeń pośredniczących przy zapewnieniu ich dostępności dla wielu urządzeń końcowych, następnie uogólniając algorytm lokalizacji poprzez wprowadzenie cykliczności wynikającej ze zmienności warunków radiowych i ostatecznie proponując metodę lokalizacji, która pozwala na wprowadzenia założonego poziomu nadmiarowości węzłów pośredniczących.

W celu oceny efektywności proponowanych metod Doktorantka wykorzystwała narzędzia środowiska symulacyjnego OMNeT++. Badania porównawcze brały pod uwagę topologie sieci o losowym rozmieszczeniu węzłów oraz topologie opracowane na podstawie danych pochodzących z rzeczywistych wdrożeń sieci IoT. Przeprowadzone badania testowe wykazały, że opracowane rozwiązania pozwalają na uzyskanie sieci o mniejszy zużyciu energii w całej sieci w porównaniu do rozwiązań znanych z literatury przedmiotu.

Tematyka rozprawy niewątpliwie wpisuje się w aktualne trendy badawcze w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja. Zagadnienia związane z optymalizacją energetyczną niskoemisyjnych sieci rozległych, w tym w rozwiązaniach IoT, wpisują się w aktualne i istotne obszary badawcze podejmowane przez badaczy na całym świecie.

- **Jaki jest problem naukowy podejmowany przez Autorkę i czy został on trafnie sformułowany?**

Problemem naukowym, którego rozwiązania podjęła się Doktorantka było opracowanie rozwiązania umożliwiającego optymalny wybór lokalizacji węzłów pośredniczących w przekazywaniu danych pomiędzy urządzeniami końcowymi oraz bramami w sieci LoRaWAN. Autorka założyła, że optymalny wybór lokalizacji węzłów pośredniczących będzie wynikać z optymalność energetycznej sieci, a optymalność ta rozumiana jest zapewnienie możliwie najdłuższego czasu działania sieci LoRaWAN.

Doktorantka wykazała potrzebę prowadzenia badań i ich oryginalność. Autorka przedstawiała znaczenie wybranego problemu badawczego również w kontekście innych badań dotyczących podobnych problemów. Na podstawie analizy problemu badawczego Doktorantka sformułowała następującą tezę rozprawy: „*Odpowiedni dobór węzłów pośredniczących w sieci LoRa poprawia efektywność energetyczną sieci*”.

Autorka trafnie wskazała obszar badań, problem naukowy oraz tezę rozprawy.

- **Czy Autorka rozwiązała problem i czy wykorzystwała w tym celu właściwe metody?**

W celu rozwiązania problemu Doktorantka opracowała dwie główne metody lokalizacji węzłów pośredniczących: metodę wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących z indywidualnym przyporządkowaniem oraz metodę adaptacyjnego wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w zmiennych warunkach.

Metoda wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących z indywidualnym przyporządkowaniem zwraca zestaw lokalizacji węzłów pośredniczących wraz z przyporządkowanymi do nich urządzeniami końcowymi. W ramach tej metody Autorka zaproponowała funkcję wagową służącą do oceny kosztu energetycznego zapewnienia łączności pomiędzy węzłami, którą można wykorzystać do efektywnego energetycznie wyboru kandydatów na węzły pośredniczące. Metoda ta rozwiązuje problem skojarzenia pomiędzy urządzeniem końcowym i węzłem pośredniczącym w oparciu o algorytm optymalizacji kolonii mrówek (ACO). W pracy przedstawiono analizę stabilności działania algorytmu, analizę czasową i ocenę jego złożoności. Porównano uzyskane wyniki z wynikami uzyskiwanymi metodami dokładnymi (metodą węgierską (MK) oraz z podejściem Edmonds'a (ED)) oraz z rozwiązaniem referencyjnym znanym z literatury dla różnych scenariuszy testowych. Wykazano, że zastosowany w tej metodzie algorytm heurystyczny pozwala na uzyskanie wyników bliskich rozwiązaniom optymalnym, dla przykładowych rozmiarów problemów, w czasie krótszym od metod dokładnych. Doktorantka przedstawiała również porównanie rezultatów z wynikami uzyskanymi dla metody referencyjnej, dla kilku scenariuszy testowych, w których rozważono różne warunki propagacyjne i poziomy naładowania baterii urządzeń końcowych. Wykazano, że proponowana metoda pozwala na bardziej efektywny dobór węzłów pośredniczących, w którym działanie wszystkich węzłów w sieci, przez założony okres jej aktywności, nie jest zagrożone.

Poprzednio opisana metoda została wykorzystana w *metodzie adaptacyjnego wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w zmiennych warunkach*. W metodzie tej zaproponowano mechanizm zamiany dotychczasowych węzłów pośredniczących na energetycznie bardziej optymalne. Zmiana ta podyktowana jest zmieniającymi się możliwościami wybranych węzłów pośredniczących do pełnienia swojej funkcji. Wraz ze zmianą warunków propagacji sygnału radiowego (które w pracy interpretowane są jako zmiana współczynnika SF) zmieniają się koszty energetyczne wymagane do zapewnienia niezwodnej komunikacji (koszt przesłania pakietu). W celu optymalności wyboru węzła pośredniczącego Autorka zaproponowała specjalną funkcję, która określa potencjał pracy węzła jako węzła pośredniczącego. Funkcja ta jest ważnym elementem metody, która służy do monitorowania i aktualizacji zestawu lokalizacji węzłów pośredniczących. W rozprawie przedstawiono również ocenę złożoności obliczeniowej metody. Prezentowane w pracy wyniki oceny efektywności energetycznej sieci przedstawione zostały dla ośmiu scenariuszy testowych, w tym sześciu opartych na danych

pochodzących z rzeczywistych, wielkoskalowych komercyjnych wdrożeń Internetu Rzeczy działających w technologii LoRaWAN z losowym wyborem określonego procenta liczby urządzeń końcowych o ograniczonej łączności z siecią. Uzyskane wyniki potwierdzają, że proponowana metoda jest efektywniejsza energetycznie we wszystkich przedstawionych scenariuszach testowych. W badaniach uwzględniono nie tylko wpływ zużycia baterii na możliwość wyboru węzła pośredniczącego, ale również wprowadzono element okresowej zmiany warunków propagacyjnych w trakcie trwania symulacji.

W ramach pracy zaproponowano również *metodę lokalizacji węzłów pośredniczących z redundancją.* W przypadku sieci LoRaWAN zastosowanie nadmiarowych węzłów pośredniczących może znacząco wpłynąć na niezawodność sieci rozumianą jako prawdopodobieństwo utraty pakietu. Zmodyfikowana metoda pozwala na wyznaczenie - zamiast jednego węzła pośredniczącego – kilku węzłów pośredniczących umożliwiających równoczesne połączenie z siecią danego węzła o ograniczonej łączności. W metodzie tej wykorzystano rozwiązania zaproponowane dla metody adaptacyjnego rozmieszczenia węzłów oraz odpowiednio zmodyfikowaną funkcję oceny działania węzła w trybie pośredniczącym. Wyniki uzyskane w tej metodzie ilustrują wpływ wyłączenia części węzłów pośredniczących z pełnienia swoje funkcji na efektywność energetyczną całej sieci w założonym czasie działania.

Autorka wykorzystwała odpowiednie metody badawcze do przeprowadzenia zaplanowanych badań i osiągnięcia zakładanych rezultatów. Tym samym można stwierdzić, że Autorka rozwiązała postawiony problem badawczy i wykorzystała w tym celu właściwe metody badawcze.

- **Na czym polega oryginalny wkład Autorki w dyscyplinę?**

Badania prowadzone przez Autorkę w ramach rozprawy doktorskiej dotyczą problemu rozmieszczenia węzłów pośredniczących w sieci LoRaWAN.

Oryginalny wkład Autorki w dyscyplinę polega na autorskiej propozycji zestawu kryteriów i metod optymalizacji wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRaWAN z punktu widzenia minimalizacji zużycia energii w sieci oraz maksymalizacji czasu jej działania. Opracowane przez Autorkę techniki biorą pod uwagę charakterystyki i parametry istotne dla działania technologii LoRaWAN. Uwzględniają poziomy naładowania baterii oraz warunki propagacyjne. Warunki propagacyjne wpływają na wykorzystanie określonej wartości współczynnika rozpraszania (SF), a więc na konieczność zużycia określonej ilości energii podczas wysłania pakietu. Zaproponowane przez Doktorantkę metody pozwalają również na uwzględnienie tego wpływu na proces optymalizacji energetycznej sieci.

Ważnym aspektem wkładu Autorki są propozycje funkcji dla procedur optymalizacji wyboru węzłów pośredniczących w sieci LoRaWAN. Funkcje te mają zapewnić optymalizację zużycia energii w sieci poprzez minimalizację kosztów zużycia energii na przesłanie pakietów oraz dzięki maksymalnemu wydłużeniu czasu działania węzłów sieci zasilanych baterią. Taka konstrukcja funkcji ma duże znaczenie w przypadku zastosowań sieci LoRaWAN do połączeń urządzeń Internetu Rzeczy, ponieważ pozwala na zachowanie ograniczeń związanych ze zużyciem energii w tych urządzeniach, także wtedy gdy będą one pełniły funkcję węzła pośredniczącego.

Wszystkie zaproponowane rozwiązania pozwalają na zwiększenie niezawodności oraz optymalizację czasu działania sieci LoRaWAN łączących urządzenia IoT. Zagadnienia związane z zapewnianiem niezawodności i optymalizacji energetycznej sieci są ważne i aktualne. Można więc stwierdzić, że opracowane przez Doktorantkę metody stanowią nowy wkład w dyscyplinę informatyka techniczna i telekomunikacja.

- **Jakie jest znaczenie poznawcze oraz znaczenie praktyczne wkładu Autorki?**

Opracowanie metod optymalnej energetycznie lokalizacji węzłów pośredniczących zaprezentowanych w pracy wymagało dokładnego zapoznania się z mechanizmami działania urządzeń sieci LoRaWAN. Autorka wykorzystwała w tym celu m. in. analizę obszernego zbioru danych pochodzących z dwóch sieci komercyjnych. Pozwoliły one Doktorantce na lepsze określenie parametrów liczbowo i jakościowo opisujących urządzenia sieci LoRaWAN. Z pewnością duże znaczenie poznawcze miało opracowanie nowych funkcji służących do oceny efektywności energetycznej węzłów, w szczególności pod kątem pełnienia przez nie roli węzłów pośredniczących. Zebrane doświadczenia pozwoliły Autorce na opracowanie założeń i koncepcji metod przedstawionych w pracy i z pewnością przyczyniły się do podniesienia ich walorów praktycznych.

Znaczenie poznawcze ma również sposób przeprowadzenia oceny jakości proponowanych metod. Doktorantka zastosowała platformę testową składającą się z modelu symulacyjnego oraz narzędzia symulatora zdarzeń dyskretnych. Połączenie tych dwóch elementów pozwoliło na przeprowadzenie symulacji działania sieci w konfiguracjach uzyskanych wcześniej jako wynik działania zaproponowanych metod lokalizacji węzłów pośredniczących. Platforma pozwoliła Autorce na przebadanie różnych scenariuszy i umożliwiła lepsze zrozumienie możliwości i ograniczeń sieci LoRaWAN.

Rozprawa ma przede wszystkim znaczenie praktyczne. W ramach kolejnych etapów prac Doktorantka sukcesywnie zwiększała poziom ogólności proponowanego rozwiązania. Rozpoczynając od lokalizacji pojedynczych węzłów pośredniczących dedykowanych pojedynczym urządzeniom końcowym o ograniczonej łączności, kolejno ograniczając liczbę urządzeń pośredniczących przy zapewnieniu ich dostępności dla wielu urządzeń końcowych, następnie uogólniając algorytm lokalizacji poprzez

wprowadzenie cykliczność wynikającej ze zmienności warunków radiowych i ostatecznie proponując metodę lokalizacji, która pozwala na wprowadzenia założonego poziomu nadmiarowości węzłów pośredniczących. Powstałe metody mogą mieć duże znaczenia praktyczne, ponieważ nie tylko umożliwiają optymalne energetycznie zaprojektowanie sieci LoRaWAN łączących urządzenia Internetu Rzeczy, ale pozwalają na ich cykliczną optymalizację.

- **Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy Autorki w zakresie nauk technicznych i szczegółowej wiedzy odpowiadającej zakresowi badań?**

Tematyka rozprawy jest związana z dyscypliną naukową informatyka techniczna i telekomunikacja. Obszerna literatura przytoczona w pracy (spis publikacji zawiera 122 pozycje) świadczy o rozległej wiedzy i orientacji Autorki w dziedzinie, którą uprawia. Zamieszczone pozycje z ostatnich lat (ponad 23% cytowanych prac zostało opublikowane po 2020 roku) potwierdzają, że Doktorantka nie zajmuje się tematyką wyczerpaną, lecz przeciwnie, jest ona aktualna i inspirująca badawczo. O kompetencji Autorki świadczy 13 prac współautorskich, które zostały wymienione w rozprawie. Trzy spośród nich stały się podstawą rozprawy, w tym dwa artykuły w opublikowane czasopismach międzynarodowych „Sensors” (IF=3,4; 100 pkt.) oraz „ACM Transactions on Sensor Networks” (IF=3,9; 140 pkt.) i jeden na ważnej dla dyscypliny konferencji „ACM International Wireless Communications and Mobile Computing Conference” (70 pkt.).

Doktorantka wykazała się dużą wiedzą dotyczącą zagadnień podejmowanych w pracy. Przedstawiona w pracy analiza obecnego stanu wiedzy jest wyczerpująca. Autorka wykazała się znajomością tematyki związanej z technologią LoRaWAN oraz potrafiła w oparciu o algorytmy optymalizacji kolonii mrówek i algorytm zachłanny opracować nowe algorytmy i metody heurystyczne. Doktorantka potwierdziła również znajomość narzędzi badawczych, w tym symulatora zdarzeń dyskretnych, który wykorzystwała do oceny jakości proponowanych metod.

Mogę zatem stwierdzić, że zakres rozprawy świadczy o dostatecznej wiedzy Autorki w zakresie nauk technicznych i potwierdza jej szczegółową wiedzę w tematyce odpowiadającej zakresowi badań przedstawionych w pracy.

- **Jakie są słabe strony rozprawy?**

Bezpośrednio w odniesieniu do rozważań zawartych w rozprawie trudno jest sformułować uwagi krytyczne. Doktorantka od kilku lat z powodzeniem zajmuje się podejmowaną problematyką. Większość wyników przedstawionych w rozprawie została przedtem opublikowana w istotnych dla podejmowanej tematyki czasopismach i materiałach konferencji, gdzie podlegała wszechstronnej analizie i ocenie. Lektura rozprawy skłania jednak do sformułowania kilku uwag i pytań:

- W opisie tabeli 5.1 umieszczonej na stronie 77 znalazł się skrót „EK” w opisie metody, ale sądząc po kontekście jego użycia wydaje się, że chodziło o metodę oznaczoną w pracy „ED”?
- W kilku pozycjach umieszczonych w spisie literatury, w tym również w pracach Autorki, można zaważyć drobne braki opisu: brakuje np. roku publikacji w pozycjach [47-48, 55, 67, 95, 108].
- W rozprawie znalazło się wiele skrótów przywoływanych w rozdziałach w których nie były wprowadzone. Moim zdaniem czytelność pracy mógłby poprawić spis najważniejszych oznaczeń, który niestety nie został umieszczony w pracy.
- Czy przedmiotem badań były scenariusze graniczne, które doprowadziłyby do wyczerpania zasobów energetycznych części węzłów. Czy taki scenariusz zdaniem Autorki ma znaczenie praktyczne? Być może warto przeprowadzić analizę odwrotną tzn. uzyskać odpowiedź na pytanie wybór których węzłów pośredniczących doprowadzi do największego skrócenia czasu działania sieci.
- Czy Autorka rozważała wykorzystanie zaproponowanych funkcji oceny energetycznej węzłów pośredniczących oraz doświadczeń zebranych podczas analizy wyników uzyskanych z sieci komercyjnych do opracowania generatora topologii sieci LoRaWAN?

W rozprawie nie znalazłem błędów merytorycznych, a zastrzeżenia lub wątpliwości, o których pisałem powyżej dotyczą raczej strony redakcyjnej pracy, lub mają charakter polemiczny i nie mogą mieć wpływu na ostateczną pozytywną ocenę pracy. Uważam, że recenzowana rozprawa zawiera wiele oryginalnych wyników i wnosi wartościowy wkład w rozwój informatyki technicznej i telekomunikacji.

- **Czy rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy?**

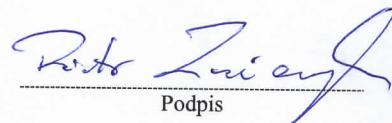
Cel, zakres, podstawy metodologiczne, rezultaty osiągnięte w rezultacie badań i sformułowane wnioski zostały przedstawione w rozprawie wystraszająco jasno i precyzyjnie. Doktorantka wykazała, że skutecznie opanowała logikę działania komponentów stosowanych w środowisku LoRaWAN i potrafi ją wykorzystać w badaniach eksperymentalnych. Posiada również dużą wiedzę dotyczącą technicznych i implementacyjnych aspektów środowiska LoRa. Autorka jasno przedstawiła swój wkład w rozwój dziedziny badań, w której mieści się rozprawa. Strona redakcyjna i terminologiczna rozprawy nie budzą większych zastrzeżeń. Istnieje również realna szansa na komercyjne wykorzystanie metod i rozwiązań przedstawionych w rozprawie.

Biorąc pod uwagę przedstawione wnioski i wymagania zawarte w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742, z późn. zm.), uważam, że **rozprawa**

doktorska mgr Anny Strzoda pt. „Dobór lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa oraz ich wpływ na efektywność sieci” zawiera oryginalne rozwiązania problemu naukowego oraz dowodzi, że Autorka posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja i posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej Pani mgr Anny Strzoda pt. „Dobór lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa oraz ich wpływ na efektywność sieci” do publicznej obrony.

Jednocześnie biorąc pod uwagę wysoką wartość merytoryczną opracowanych metod, ich zakres i praktyczny charakter, wyrażam przekonanie, że spełniają one z wyraźnym nadmiarem wymagania ustawy o tytule naukowym i stopniach naukowych i dlatego **wnioskuję o jej wyróżnienie.**


Podpis