

Łódź, dnia 18.03.2025

dr hab. inż. Piotr Lipiński
Politechnika Łódzka
Instytut Informatyki
Wydział Fizyki Technicznej Informatyki i Matematyki Stosowanej
ul. Wólczańska 215
93-005 Łódź
e-mail: piotr.lipinski@p.lodz.pl

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA:
RADY NAUKOWEJ INSTYTUTU INFORMATYKI UNIwersYTETU ŚLĄSKIEGO W KATOWICACH**

Tytuł rozprawy:

**ALGORYTMY DYNAMICZNEJ SELEKCJI WĘZŁA NADRZĘDNEGO W CELU
WYDŁUŻANIA CZASU ŻYCIA BEZPRZEWODOWEJ SIECI SENSOROWEJ**

Autor rozprawy: mgr Marcin Lewandowski
Promotor: dr hab. inż. Bartłomiej Płaczek, prof. UŚ
Promotor pomocniczy: dr inż. Tomasz Orczyk

1. Wstęp

Niniejsza recenzja została sporządzona na podstawie pisma Pana Przewodniczącego Rady Naukowej Instytutu Informatyki Uniwersytetu Śląskiego dr hab. inż. Rafała Drozda, prof. UŚ w Katowicach z dnia 18.12.2024 r. w przedmiocie wyznaczenia recenzentów rozprawy doktorskiej Pana mgr Marcina Lewandowskiego w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora w dziedzinie Nauk Ścisłych i Przyrodniczych w dyscyplinie Informatyka.

Rada Naukowa Instytutu Informatyki, działając na podstawie §36 ust. 3 Statutu Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach oraz §11 ust.1 załącznika do uchwały nr 293 Senatu Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach z dnia 28 czerwca 2022 r. w przedmiocie sposobu postępowania w sprawie nadania stopnia doktora, w związku z art. 190 ust.2 z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2024 poz. 1571 z póź. zm.) powołała mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej Pana mgr Marcina Lewandowskiego pt. „Algorytmy dynamicznej selekcji węzła nadrzędnego w celu wydłużenia czasu życia bezprzewodowej sieci sensorowej”. Do pisma dołączono tekst rozprawy oraz streszczenie w języku angielskim.

2. Przedmiot i zakres rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy zagadnień związanych z problemem wydłużania czasu życia bezprzewodowej sieci sensorowej poprzez odpowiedni wybór węzła nadrzędnego, który agreguje dane zebrane z węzłów sąsiednich i przesyła je do stacji bazowej. Rozpatrywane w pracy algorytmy bazują na założeniu, że węzły sensorowe mogą lokalnie przetwarzać

odczyty czujników i decydować czy zarejestrowane dane powinny zostać przesłane do węzła nadrzędnego.

W zależności od liczby wykonywanych transmisji, węzły sensorowe zużywają swoje zasoby energii w różnym tempie. W pracy wykazano, że uwzględniając prawdopodobieństwo transmisji danych oraz początkowy poziom naładowania baterii dla poszczególnych węzłów, można istotnie wydłużyć czas do rozładowania pierwszego węzła, jak również czas do rozładowania wszystkich węzłów w sieci.

Autor zaproponował metodę, która uwzględnia różne poziomy naładowania baterii oraz zmienne w czasie prawdopodobieństwa transmisji, która, jak wykazał, pozwoliła na wydłużenie czasu życia sieci sensorowej. Technologie transmisji danych stosowane w bezprzewodowych sieciach sensorowych różnią się pod względem zapotrzebowania na energię, zasięgu, opóźnień oraz przepustowości łącza. Opracowane algorytmy uwzględniają parametry zastosowanej technologii transmisji, co pozwala na adaptację tych algorytmów odpowiednio do specyfiki danego systemu.

3. Układ, struktura rozprawy

Rozprawa doktorska mgr Marcina Lewandowskiego pt. „Algorytmy dynamicznej selekcji węzła nadrzędnego w celu wydłużenia czasu życia bezprzewodowej sieci sensorowej” zawiera 122 strony, w tym 106 strony tekstu, spis treści oraz bibliografię. Streszczenie pracy w języku angielskim zostało dostarczone do recenzenta jako oddzielny dokument. Tekst rozprawy zawiera siedem rozdziałów. W rozdziale pierwszym Autor przedstawił podstawowe pojęcia dotyczące sieci sensorowych w tym w szczególności związane z pojęciem czasu życia sieci sensorowej jak również dokonał przeglądu technologii i zastosowań sieci tego typu. W podrozdziałach 1.4 i 1.5 wyjaśnił motywację i określił cel swojej pracy, a w podrozdziale 1.7 zawarł tezę swojej pracy. W rozdziale 3 dokonał przeglądu metod wyboru węzła nadrzędnego w celu wydłużenia czasu życia sieci sensorowej. W rozdziale czwartym zaproponował i opisał na prostym przykładzie algorytmy wydłużania czasu życia sieci sensorowej dla dwóch najczęściej stosowanych metryk, tj. czasu rozładowania jednego i wszystkich węzłów sieci sensorowej. Omówił również złożoność obliczeniową zaproponowanych algorytmów. W rozdziale piątym przedstawił model wielowęzłowej bezprzewodowej sieci sensorowej wraz z autorskimi algorytmami selekcji węzła nadrzędnego: Probability-Driven Cluster-head Rotation (PDCR) oraz Frame-Driven Cluster-head Rotation (FDCR). W rozdziale szóstym przedstawił metodykę oraz wyniki przeprowadzonych eksperymentów przeprowadzonych dla dwóch wybranych technologii: ZigBee i LoRaWAN. W podsumowaniu omówił otrzymane wyniki oraz nakreślił kierunki dalszych badań.

4. Analiza źródeł i stanu wiedzy.

Analiza źródeł i stanu wiedzy dotyczącego zakresu rozprawy została przeprowadzona w rozdziałach drugim i trzecim. W rozdziale drugim autor skoncentrował się na metodach wydłużania czasu życia sieci sensorowej, w tym w szczególności na zagadnieniach związanych z: przydzielaniem zasobów poszczególnym węzłom, pozyskiwaniem energii, redukcją ilości przesyłanych danych, klasteryzacją oraz zmianami roli węzła. W rozdziale trzecim autor dokonał przeglądu istniejących algorytmów wyboru węzła nadrzędnego na podstawie wpływu czasu oraz zużycia energii.

Analiza źródeł dotyczących zakresu rozprawy pozwala stwierdzić, że przegląd literatury jest obszerny, zawiera bowiem 175 pozycji, i aktualny, ponieważ znaczna część z tych pozycji została opublikowana na przestrzeni ostatnich 5 lat, przy czym dwie zostały opublikowane w roku złożenia

pracy, a kolejnych dziesięć w roku poprzedzającym. W ocenie recenzenta przeprowadzona przez autora analiza stanu wiedzy jest wystarczająca i dobrze odpowiada zakresowi pracy.

Podsumowując, należy uznać, że autor przeprowadził analizę stanu wiedzy w sposób prawidłowy, co potwierdza dostateczną wiedzę autora i znajomość literatury w dyscyplinie naukowej, której dotyczy praca.

5. Wartość naukowa rozprawy

Rozprawa doktorska mgr Marcina Lewandowskiego wpisuje się w popularną w ostatnich latach tematykę Internetu Rzeczy. W szczególności, autor koncentruje się na problemach wydłużania czasu życia bezprzewodowej sieci sensorowej (Wireless Sensor Network - WSN) poprzez odpowiedni wybór węzła nadrzędnego, który agreguje dane zebrane z węzłów sąsiednich i przesyła je do stacji bazowej. Zagadnienie to badane jest już od kilku dekad i jest dobrze ugruntowane obszary badań naukowych. O aktualności zagadnienia, którym zajmuje się autor najlepiej może świadczyć fakt, że prawie równocześnie ze złożeniem przez autora rozprawy, której dotyczy niniejsza recenzja, opublikowane zostały dwa artykuły o bardzo zbliżonej tematyce. Pierwszy, opublikowany w listopadzie 2024 roku, zatytułowany: „An efficient neural network LEACH protocol to extended lifetime of wireless sensor networks” autorstwa Hamdy H. El-Sayed, Elham M. Abd-Elgaber, E. A. Zanaty, Faisal S. Alsubaei, Abdulaleem Ali Almazroi i Samy S. Bakheet, w którym, podobnie jak w pracy będącej przedmiotem niniejszej recenzji, w procesie wyboru węzła nadrzędnego uwzględniane są wybrane dane historyczne. Z kolei w drugim artykule, opublikowanym we wrześniu 2024 roku zatytułowanym „Improved energy efficiency performance on WSN using event-driven T-LEACH” autorstwa Kusvihawan Shihab i Rendy Munadi, autorzy uwzględniają zdarzenia występujące w procesie obserwacyjnym. Warto zauważyć, że są to podobne koncepcje do tych przedstawionych w rozprawie związane z uwzględnieniem prawdopodobieństwa w procesie wyboru węzła. Warto również podkreślić, że wobec bardzo szybkiej popularyzacji systemów WSN optymalne zarządzanie energią w takich systemach jest zagadnieniem bardzo istotnym i aktualnym. Uwzględniając przytoczone powyżej fakty, należy uznać, że **tematyka rozprawy jest aktualna i bardzo istotna z praktycznego punktu widzenia.**

Przyjęte w pracy algorytmy transmisji bazują na założeniu, że węzły sensorowe mogą lokalnie przetwarzać odczyty czujników i decydować czy zarejestrowane dane powinny zostać przesłane do węzła nadrzędnego. W zależności od liczby wykonywanych transmisji, węzły sensorowe zużywają swoje zasoby energii w różnym tempie. Autor w pracy stwierdza, że uwzględniając prawdopodobieństwo transmisji danych oraz początkowy poziom naładowania baterii dla poszczególnych węzłów, można istotnie wydłużyć czas pracy sieci WSN formułując następującą tezę: *„Uwzględnienie prawdopodobieństw transmisji danych w algorytmie podejmowania decyzji dotyczącej zmiany węzła nadrzędnego pozwala wydłużyć czas życia sieci sensorowej składającej się z węzłów współpracujących w ramach klastra”.*

Tak sformułowana teza została udowodniona dzięki opracowaniu, implementacji oraz weryfikacji praktyczno-symulacyjnej przez autora trzech nowych metod:

1. Metody wydłużającej czas rozładowywania pojedynczego węzła - rozdział 4.1.
2. Metody Probability-Driven Cluster-head Rotation (PDCR) – rozdział 5.2.
3. Metody Frame-Driven Cluster-head Rotation (FDCR) – rozdział 5.2.

Pierwsza z zaproponowanych przez autora metod, opisana w rozdziale 4.1, ma na celu wydłużenie czasu do rozładowania pary węzłów w sieci sensorowej poprzez równoważenie zużycia energii w obu węzłach. Metoda jest opisana bardzo klarownie i uzupełniona przykładami obliczeniowymi. Niestety zastosowane w tej metodzie algorytmy korzystają z bardzo uproszczonych modeli liniowych, które nie uwzględniają szeregu zjawisk nieliniowych i losowych występujących w rzeczywistym systemie. Ponadto, wykorzystanie w tej metodzie jedynie uśrednionych wartości prawdopodobieństwa sprawia że jej wartość naukowa jest ograniczona. Ciekawym z punktu widzenia rozważań naukowych byłoby na przykład uwzględnienie nieliniowości źródła energii w węźle, wydatku energetycznego związanego z przełączaniem węzłów czy odległości węzła od stacji bazowej. Z kolei interesującym zagadnieniem, które porusza autor w tym kontekście, jest złożoność obliczeniowa zaproponowanych algorytmów zastosowanych do równoważenia zużycia energii. Niestety w przeprowadzonej analizie, brakuje szacowania narzutu energetycznego związanego z działaniem algorytmów równoważenia zużycia energii w węzłach. Jest to o tyle istotne, że w przypadku mocno zminiaturyzowanych węzłów narzut ten może nie być pomijalny. Wobec braku takiej analizy recenzent nie znajduje z kolei uzasadnienia do analizy złożoności obliczeniowej algorytmów obliczeniowych przeprowadzonych w rozdziale czwartym. Pewną wątpliwość budzi również kwestia uniwersalności uzyskanych wyników.

Druga z zaproponowanych przez autora metod została przez autora nazwana *Probability-Driven Cluster-head Rotation* (PDCR). Stanowi ona rozwinięcie protokołu Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy autorstwa Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan i Hari Balakrishnani (2000) oraz *Energy-Driven Cluster-head Rotation* (EDCR) autorstwa Sankalpa Gamwarige and Chulantha Kulasekera (2005). Nowość zaproponowanej metody polega na uwzględnieniu w procesie wyboru węzła nadrzędnego prawdopodobieństwa transmisji danych z węzłów podrzędnych. Zgodnie z tym algorytmem prawdopodobieństwo transmisji jest wyznaczane przez węzeł nadrzędny na podstawie stanu licznika transmisji danych, który został ustalony w poprzednim kroku. Niewątpliwie takie podejście spełnia kryteria nowości.

Trzecia z zaproponowanych przez autora metod, nazwana *Frame-Driven Cluster-head Rotation* (FDCR), uwzględnia w procesie wyboru węzła nadrzędnego liczbę ramek odebranych przez węzeł nadrzędny. Stanowi ona uproszczenie metody PDCR, bierze bowiem pod uwagę jedynie łączną liczbę wykonanych transmisji bez szacowania wpływu tych transmisji na poziom energii dostępnej w węzłach, co przekłada się na prostotę implementacji rozwiązania w węzłach sensorowych. Zgodnie z algorytmem FDCR, rola węzła nadrzędnego jest przekazywana do następnego węzła sensorowego, jeżeli liczba odebranych przez węzeł nadrzędny transmisji danych osiągnie predefiniowany próg. Uproszczenie algorytmu PDCR pozwala, zwłaszcza w sieciach składających się z wielu węzłów, na znaczne zmniejszenie złożoności obliczeniowej algorytmu wyboru węzła nadrzędnego. Również w przypadku tej metody należy uznać, że zawiera ona elementy nowości.

Zaproponowane przez autora metody zostały zaimplementowane i przetestowane, na fizycznej sieci sensorowej dla technologii LoRaWAN oraz częściowo dla technologii ZigBee. Dokonano również dogłębnej analizy wpływu stopnia naładowania baterii w węzłach na czas życia sieci.

W ocenie recenzenta praca przedstawiona do oceny właściwie analizuje omawiane zagadnienie. Autor rozwiązał postawione przed nim problemy naukowe, które pojawiły się podczas realizacji praktycznych zadań. Uzyskane podczas prowadzonych badań wyniki były publikowane na szeregu konferencji oraz w uznanych czasopismach, co świadczy o innowacyjności zastosowanych rozwiązań. Praca zawiera więc wszystkie elementy, od praktycznego projektu i wynikającego z niego problemu badawczego, poprzez odpowiedni dobór rozwiązań, kontekst matematyczny, po oryginalne wyniki,

pokazujące wyższość zastosowanych rozwiązań nad wynikami uzyskiwanymi przy użyciu innych znanych metod.

Podsumowując analizę osiągnięć doktoranta można stwierdzić, że wszystkie koncepcje przedstawione w rozdziałach 4.1 i 5.2 jako autorskie, dalej poparte wynikami praktycznymi opisanymi w rozdziale szóstym zawierają elementy nowości. **Należy zatem uznać, że uwzględniając stan wiedzy i techniki reprezentowanych przez literaturę światową, tematyka rozprawy jest aktualna, rozprawa jest oryginalna i stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, co potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez jej autora.** W kontekście wyżej przedstawionych faktów należy również stwierdzić, że **tezy rozprawy zostały sformułowane i zweryfikowane w sposób prawidłowy.**

6. Uwagi krytyczne i pytania

Niezależnie od ogólnie pozytywnej oceny merytorycznej pracy, niektóre jej fragmenty wzbudzają pewne wątpliwości wymagające szerszego omówienia:

1. Opis metodyki przeprowadzonych eksperymentów jest nie do końca precyzyjny. Nie jest bowiem w ocenie recenzenta jasne, czy weryfikacja eksperymentalna polegała na przeprowadzeniu pomiarów zużycia energii dla węzła nadrzędnego i podrzędnego dla dwóch standardów sieci ZigBee oraz LoraWAN, a następnie symulacyjnie wyznaczano czas życia sieci składającej się z trzech i dziesięciu węzłów, czy też eksperymenty były prowadzone na przy użyciu fizycznych sieci składających się z trzech i dziesięciu węzłów.
2. Nie przeprowadzono badań w zakresie wpływu rozmiaru sieci sensorowej na działanie zaproponowanych algorytmów.
3. Jaki wpływ na uzyskane wyniki miała modułowa budowa węzła? Czy na uzyskane wyniki miałby wpływ zastosowanie na przykład węzła zbudowanego w postaci pojedynczego układu reprogramowalnego lub układu scalonego (proporcje zużycia energii oraz charakterystyka jej zużycia mogłyby być diametralnie inne). Czy uzyskane wyniki są w tym zakresie uniwersalne, czy ograniczone jedynie dla węzłów o podobnej budowie?
4. Czy podczas prowadzonych eksperymentów brany był pod uwagę wydatek energetyczny związany z przełączeniem węzła?
5. W pracy wykazano praktycznie liniową zależność pomiędzy ilością zużytej energii oraz czasem pracy węzła przy stałym prawdopodobieństwie transmisji. Dla jak szerokiego zakresu wartości parametrów taka zależność pozostaje prawdziwa? Czy zweryfikowano ją eksperymentalnie?
6. W kontekście algorytmu opisanego w rozdziale 4.1, czy wyniki przedstawione na rys. 4.9 mają charakter uniwersalny? Jak zmiany parametrów poszczególnych węzłów mogłyby wpłynąć na liczbę iteracji algorytmu?
7. Czy odległości pomiędzy węzłami mogą mieć wpływ na uzyskane wyniki? Chodzi w szczególności o ustalenie jak zagadnienie odpowiedniej budowy klastrów opisane m.in. w artykule: „Adaptive Probabilistic Model for Energy-Efficient Distance-based Clustering in WSNs (Adapt-P): A LEACH-based Analytical Study” autorstwa Husama Suleimana i Mohammada Hamdana wpływa na uzyskane wyniki.
8. Rozszerzenie porównań przedstawionych w rozdziale szóstym o nowsze algorytmy, takie jak na przykład: Centralized LEACH, LEACH-GA, GADA-LEACH, TEEN, μ GA-LEACH, lub szersza analiza w

zakresie uzasadnienia braku takiego porównania znacznie zwiększyłaby wartość uzyskanych wyników.

Pewne niedociągnięcia wykazuje również część redakcyjna oraz edytorska pracy. Wiele zagadnień jest opisywanych pobieżnie i nieprecyzyjnie, a czasem nawet niespójnie, w tym w szczególności:

1. Autor niekonsekwentnie używa pojęcia algorytm i metoda. Na przykład str. 34, linia 3 i linia 6. Autor używa pojęć „metoda” oraz „algorytm” wymiennie, podczas gdy pojęcie metody jest pojęciem szerszym od algorytmu.
2. Autor przyjął dość specyficzną definicję pojęcia czujnika. Str. 1 wiersz 4 od dołu: Zdanie „Czujnik jest rodzajem przetwornika, który przekształca dany rodzaj energii na energię elektryczną” jest nieprecyzyjne, nie wszystkie bowiem czujniki przekształcają sygnał wejściowy na energię elektryczną. Co więcej, nie wszystkie czujniki wymienione w Tabeli 1.1 muszą spełniać przytoczoną definicję. Warto byłoby podać źródło definicji czujnika w przytoczonej przez autora wersji albo doprecyzować co dokładnie autor miał na myśli pisząc wyżej wymienione zdanie.
3. W ocenie recenzenta topologia przedstawiona na rysunku 1.3(b) nie jest topologią drzewa, gdyż zawiera cykle. Jeżeli autor stosuje nietypowe nazewnictwo warto byłoby przytoczyć źródło takiej definicji lub szerzej ją wyjaśnić.
4. Pewne wątpliwości budzą w ocenie recenzenta wzory 1.1 i 1.2. We współczesnych urządzeniach bardziej precyzyjnym byłoby chyba posługiwanie się wartością pewnego progu minimalnego energii zgromadzonej w węźle, poniżej którego zgromadzona energia może być niewystarczająca do zbierania lub przesłania danych. Współczesne węzły sieci sensorowej rzadko rozładowują się całkowicie.
5. Tytuł rozdziału 4.1 jest mylący, zwłaszcza w kontekście tytułu rozdziału 4.2. W tytule bowiem mowa jest o wydłużeniu czasu do rozładowania jednego węzła, podczas gdy dalej w treści (np. linia 8) mowa jest o sieci składającej się z dwóch węzłów, a w rozdziale 4.2 mowa jest o wszystkich węzłach. Warto byłoby uporządkować rozważania i omówić zagadnienie czasu życia sieci sensorowej składającej się z 2 węzłów na podstawie dwóch kryteriów rozładowania sieci: czasu do rozładowania jednego węzła i czasu do rozładowania wszystkich (dwóch) węzłów.
6. Autor przyjął specyficzną, choć trzeba przyznać, że konsekwentną, metodę numerowania stron: strony zawierające tytuły rozdziałów zawierają numery stron w środkowej części stopki (na dole), natomiast wszystkie pozostałe, w prawej części nagłówka (w prawym górnym rogu strony).
7. Kolory, którymi oznaczono przebiegi na wykresach 6.62, 6.53, 6.55, 6.58-6.61, 6.65-6.69, 6.72-6.75, 6.78 są trudne do rozróżnienia. Warto byłoby zastosować inne rodzaje linii (kropkowane, kreskowane) w celu ich zróżnicowania.

7. Podsumowanie i ocena końcowa

Niezależnie od pewnej liczby uwag krytycznych, które, co należy podkreślić, pojawiają się w odniesieniu praktycznie do każdej rozprawy doktorskiej, w ocenie recenzenta rozprawa doktorska mgr Marcina Lewandowskiego zatytułowana „Algorytmy dynamicznej selekcji węzła nadrzędnego w celu wydłużenia czasu życia bezprzewodowej sieci sensorowej” **spełnia wymagania stawiane**

rozprawom doktorskim zgodnie z art. 187 ust. 1 i 2 „*Ustawy z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*” (Dz. U. 2024 poz. 1571).

Recenzent wnioskuje do Rady Naukowej Instytutu Informatyki Uniwersytetu Śląskiego o jej przyjęcie i dopuszczenie mgr. Marcina Lewandowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego

Piotr Lipiński