

Recenzja rozprawy doktorskiej

Imię i nazwisko kandydata: Marcin Lewandowski

Tytuł rozprawy doktorskiej:

**Algorytmy dynamicznej selekcji węzła
nadrzędnego w celu wydłużania czasu życia
bezprzewodowej sieci sensorowej**

Promotor: dr hab. inż. Bartłomiej Płaczek

Promotor pomocniczy: dr inż. Tomasz Orczyk

Recenzent: dr hab. inż. Krzysztof Grochla

1. Wybór tematu pracy

Temat pracy związany jest z problemem maksymalizacji czasu działania urządzeń w sieciach sensorowych poprzez odpowiednie zarządzanie wyborem węzłów pośredniczących w transmisji. Jest to aktualny problem badawczy, mający duże znaczenie praktyczne ze względu na rosnącą popularność systemów Internetu Rzeczy oraz szerokie zastosowanie sieci sensorowych. W sieciach wieloskokowych niektóre węzły działają jako przekaźniki, co prowadzi do ich szybszego rozładowania i potencjalnego podziału sieci na fragmenty, lub konieczności wymiany baterii. Doktorant w pracy podejmuje badania mające na celu ograniczenie wpływu tego zjawiska dzięki zastosowaniu algorytmów dynamicznego wyboru węzła nadrzędnego. Cel pracy jest klarownie zdefiniowany, a teza została poprawnie sformułowana.

Doktorant koncentruje się na sieciach działających w oparciu o dwa standardy: IEEE 802.15.4 oraz LoRaWAN. Koszt baterii oraz koszt instalacji węzła stanowi istotną część kosztu budowy sieci sensorowej. Dlatego tworzenie metod pozwalających na wydłużenie czasu działania sieci poprzez ograniczenie zużycia energii w węzłach i zapewnienie długoterminowej pracy bez interwencji człowieka jest istotnym zagadnieniem badawczym. Jest to również tematyka podejmowana w wielu pracach naukowych w kraju i na świecie, o czym świadczy szeroki zbiór literatury cytowanej w pracy. Temat został więc dobrze wybrany i dotyczy aktualnego problemu badawczego.

2. Ocena układu rozprawy

Praca doktorska magistra Marcina Lewandowskiego składa się z siedmiu rozdziałów oraz bibliografii. Praca rozpoczyna się od wprowadzenia, w którym doktorant omawia problematykę czasu życia bezprzewodowych sieci sensorowych, przegląd technologii oraz zastosowań tych sieci. Przedstawia w nim także motywację pracy, jej cele i tezę. W drugim rozdziale doktorant zawarł przegląd metod wydłużania czasu życia sieci sensorowej, w ramach którego opisuje istniejące podejścia do optymalizacji czasu życia sieci sensorowych, w tym przydzielanie zasobów, pozyskiwanie energii, redukcję transmisji danych oraz metody klasteryzacji. W kolejnym rozdziale przedstawiono istniejące algorytmy wyboru węzła nadrzędnego, w tym metody oparte na czasie oraz zużyciu energii. W rozdziale 4 doktorant prezentuje nowe algorytmy dynamicznej selekcji węzła nadrzędnego, mające na celu optymalizację czasu życia sieci poprzez uwzględnienie prawdopodobieństw transmisji danych. W piątym rozdziale doktorant przedstawia model funkcjonowania sieci sensorowej użyty w rozprawie, w tym inicjalizację węzłów, mechanizmy selekcji węzła nadrzędnego oraz sposoby określania czasu życia sieci. Szósty rozdział zawiera analizę przeprowadzonych eksperymentów w rzeczywistych sieciach sensorowych ZigBee i LoRaWAN oraz porównanie skuteczności proponowanych algorytmów. Pracę zamyka podsumowanie, w którym doktorant podkreśla wnioski wynikające z badań i przedstawia możliwości dalszego rozwoju metod optymalizacji czasu życia sieci sensorowych.

Podział rozprawy na rozdziały jest klarowny i bardzo dobrze prowadzi czytelnika od zdefiniowania problemu, poprzez opis stanu wiedzy i opis środowiska badawczego, do propozycji nowych algorytmów opracowanych przez autora i analizy ich działania. Praca jest napisana w sposób czytelny i tytuły rozdziałów poprawnie oddają ich treść. Doktorant w większości pracy poprawnie używa przyjętych w dziedzinie pojęć, choć wyjątkiem jest tutaj opis zawarty w rozdziale 6 – użycie pojęcia „eksperymenty” może sugerować, że są to eksperymenty zrealizowane za pomocą rzeczywistych urządzeń, a nie analiza wyników opracowanego przez doktoranta modelu. Model ten, nazywany w pracy modelem obliczeniowym, realizuje symulację ze stałym krokiem czasu, ponieważ opiera się na odwzorowaniu w pamięci komputera stanu badanej sieci w czasie, a zmiany stanu systemu są określane na podstawie stanu poprzedniego i aktywności urządzeń w symulowanym kroku czasu. W tym samym rozdziale autor w sposób mało precyzyjny używa terminów określających sposób działania sieci LoRaWAN – według autora „Sieć sensorowa LoRaWAN może się składać z węzłów (nadrzędnych oraz podrzędnych), bramek (koncentratorów), serwera sieciowego (stacja bazowa) oraz serwerów aplikacji, (...)”, co nie jest w pełni poprawne, ponieważ w architekturze sieci LoRaWAN serwer sieciowy (ang. network server) kontroluje pracę wielu bram (ang. gateway) nazywanych też czasem stacjami bazowymi. W LoRaWAN nie ma osobnych urządzeń będących koncentratorami i stacjami bazowymi.

Przyjęta metoda organizacji pracy w sposób jednoznaczny pozwala na wyróżnienie wkładu własnego doktoranta od opisu stanu wiedzy. Bardzo dobrze opisano wszystkie analizowane algorytmy – sposób ich prezentacji w postaci pseudokodu pozwala na przanalizowanie ich działania i łatwe odtworzenie opracowanych metod. Rozdział 6 dobrze podsumowuje uzyskanie wyniki, choć trochę brakuje szerszej dyskusji wyników w kontekście ich zastosowania w rzeczywistych protokołach sieciowych. Podsumowanie jest napisane klarownie i w zwięzły sposób prezentuje najważniejsze wyniki badań. Układ rozprawy jest więc w pełni poprawny i przygotowany w przemyślany sposób.

3. Metodologia badawcza

Badania prowadzone w ramach rozprawy dotyczyły oceny zużycia energii podczas działania węzłów sieci sensorowej, oceny efektywności opracowanych algorytmów wyznaczenia węzła nadrzędnego za pomocą eksperymentów z wykorzystaniem modelu obliczeniowego oraz oceny złożoności zaproponowanych algorytmów.

Pomiar zużycia energii przez urządzenia wykonano prawidłowo - zastosowano układ LTC4150 – licznik kulombów, który pozwala na pomiar przepływu prądu przez obwód na podstawie spadku napięcia na rezystorze bocznikowym (shunt resistor). Jednak sposób działania węzłów sieci nie został w wystarczającym stopniu zdefiniowany lub zmierzony, aby móc uznać pomiar za wiarygodny. W pracy brak jest informacji na temat warunków transmisji, konfiguracji węzłów czy nawet rozmiarów przesyłanych pakietów. Pomiar przeprowadzano, badając trzy przypadki: węzeł pełniący rolę nadrzędną, węzeł podrzędny przesyłający dane do nadrzędnego i węzeł podrzędny nie przesyłający danych. Ilość zużytej energii jednak podczas pracy w każdym z tych trybów zależy od tego, jaki jest rozmiar danych pomiarowych (np. wysłanie pakietu z wartością zapisaną na 40 bajtach wymaga większej ilości energii niż pakietu zawierającego 4 bajty danych) lub jakie są parametry transmisji (np. zastosowanie innego

współczynnika rozpraszania w sieci LoRa powoduje znacząco różne zużycie energii przez moduł nadawczy). Wyznaczenie tylko jednej wartości zużycia energii dla danego trybu nie jest więc poprawne. Doktorant także nie spróbował oszacować zależności ilości zużytej energii przez węzeł nadrzędny od liczby obsługiwanych węzłów podrzędnych. Zależność ta nie jest liniowa, ponieważ w sieciach bezprzewodowych ilość energii zużytej przez węzeł odbierający dane zależy nie tylko od ilości odebranych pakietów, ale także czasu nasłuchiwanie w oczekiwaniu na odbiór i parametrów transmisji (np. wspomnianego wcześniej współczynnika rozpraszania czy użytej modulacji w sieciach IEEE 802.15.4).

Bardzo dobrze, że doktorant wskazał jakich układów użył i zmierzył prądy pobierane przez układ w trybie uśpienia i działania, ale założenie, iż pobór prądu przez urządzenie jest stały w danym trybie pracy jest nieuzasadnione. Np. w sieci LoRaWAN pobór prądu urządzenia nie przesyłającego dane zależy od przyjętego trybu działania: w trybie A urządzenie nasłuchuje jedynie bezpośrednio po wysłaniu pakietu, w trybie B w stałych okresach czasu, a w trybie C bez przerwy. Niestety, w rozprawie brak jest informacji, do działania w jakim trybie skonfigurowano urządzenia. Dodatkowo zużycie energii może zmieniać się w czasie wraz ze zmianą warunków propagacji radiowej (np. prowadzących do doboru przez układ innej przepływności bitowej transmisji). Ciekawe, że doktorant zauważa problem niewielkiej powtarzalności pomiarów zużycia energii – na stronie 84 wskazuje, że zaobserwowano różne wyniki poboru energii przez dany węzeł, mimo iż jego ustawienia nie były zmieniane. Jednak przypisuje tę zmienność jedynie budowie baterii, nie wskazując, w jaki sposób potwierdzono ten fakt (czy np. zweryfikowano pojemność baterii rozładowując ją za pomocą obciążenia o znanym poborze prądu?).

Całość badań proponowanych algorytmów wyboru węzła nadrzędnego została zrealizowana za pomocą autorskiego modelu, opracowanego przez doktoranta. Model ten został szczegółowo opisany w pracy w postaci pseudokodu w rozdziale 5.4. Doktorant jednak nie spróbował zweryfikować poprawności jego działania, np. poprzez porównanie zgodności wyników oceny zużycia energii oszacowanego przez model i działania tego samego algorytmu na rzeczywistych urządzeniach.

4. Analiza źródeł i stanu wiedzy

Bibliografia rozprawy obejmuje odwołania do 175 artykułów i innych prac naukowych. Są to prace opisujące tło prowadzonych badań, w tym podstawowe koncepcje związane z sieciami sensorowymi i metodami podziału sieci na klastry. Stan wiedzy jest zarysowany poprawnie, a analiza literaturowa opisująca istniejące algorytmy wyboru węzła nadrzędnego w klastrze jest dogłębna. Doktorant też dobrze dobrał zakres literatury dotyczącej innych metod wydłużenia czasu życia sieci sensorowych, np. poprzez optymalizacje ich rozmieszczenia w przestrzeni, próbkowania adaptacyjnego lub zastosowania kompresji w celu zmniejszenia ilości przesyłanych danych. Cytowane prace są związane z tematem rozprawy, a odwołania zostały umieszczone adekwatnie do treści pracy. Przegląd literatury jednak w zbyt małym stopniu odnosi się do standardów sieci bezprzewodowych, dla których wykonano analizy. Mimo oparcia rozprawy na eksperymentalnych badaniach urządzeń działających w standardach LoRaWAN i IEEE 802.15.4, opis tych technologii sieciowych jest pobieżny. W szczególności,

brak jest opisu, jak koncepcja przesyłania danych przez węzeł nadrzędny w klastrze może zostać zrealizowana w sposób zgodny z w/w standardami. W przypadku sieci LoRaWAN najszerzej stosowana wersja standardu (TS001-1.0.4 LoRaWAN® L2 1.0.4 Specification) zakłada, że wszystkie węzły transmitują dane bezpośrednio do bramy sieci. W rozszerzeniu TS011-1.0.1 Relay dodano funkcjonalność transmisji przez węzły pośredniczące, ale w pracy nie zawarto odniesienia do tej specyfikacji i wskazania, jak np. zmiana węzła nadrzędnego w klastrze ma zostać zrealizowana w architekturze sieci LoRaWAN i jak wymusić na urządzeniach końcowych przesyłanie danych przez inne węzły relay. W opisie sieci 802.15.4 poprawnie przedstawiono reaktywne i proaktywne metody routingu, ale również brakuje wystarczająco szczegółowego wskazania, jak zmiana węzła nadrzędnego ma zostać zrealizowana na poziomie sieciowym.

5. Poprawność redakcyjna rozprawy

Rozprawa została przygotowana w sposób staranny i nie zawiera znaczących błędów językowych lub redakcyjnych. Rozprawa jest napisana w sposób czytelny i zrozumiały. Sposób organizacji treści w pracy nie budzi zastrzeżeń, jednak brakuje w pracy zestawienia użytych skrótów oraz pojęć. Wykresy i rysunki zawarte w rozprawie zostały szczegółowo opisane, choć ich czytelność zmniejsza oznaczenie na legendzie jedynie numerów węzłów, bez informacji na temat ich cech (np. prawdopodobieństwa transmisji).

Za niewielką wadę redakcyjną rozprawy można uznać sposób przygotowania części z wykresów. Większość wykresów prezentujących zużycie energii (wykresy 6.2, 6.5 - 6.10, 6.13 etc.) została umieszczona w rozprawie w sposób zapewniający niewielką wysokość osi pionowej, ze stosunkowo dużym rozmiarem punktu na wykresie. Powoduje to, iż porównanie często bardzo zbliżonych wartości jest trudne.

W pracy można znaleźć drobne błędy interpunkcyjne i stylistyczne, np.: w rozdział 3, w zdaniu: „Węzeł, który ma najniższy adres logiczny zacznie przysyłać ramki synchronizacyjne, co oznacza przyjęcie roli węzła nadrzędnego” brakuje przecinka po „adres logiczny”, a w rozdziale 3 w zdaniu: „Zmiana roli węzła nadrzędnego może być problematyczna podczas implementacji.” poprawna forma powinna brzmieć: „Implementacja zmiany roli węzła nadrzędnego może być problematyczna.”

W/w drobne wady jednak nie umniejszają wysokiego poziomu redakcyjnego całości rozprawy.

6. Wartość naukowa rozprawy

Praca w sposób rzetelny przedstawia stan wiedzy w zakresie algorytmów wyboru węzłów nadrzędnych w klastrze oraz wpływu zastosowania transmisji z pośrednictwem węzłów nadrzędnych do wydłużenia czasu życia sieci sensorowych. Zaproponowane dwie nowe metody opisane w rozdziałach 4.1 i 4.2, mające na celu wydłużenie czasu życia pojedynczego węzła lub czasu działania całej sieci, rozszerzają ten stan wiedzy i są oryginalnym rozwiązaniem opracowanym przez doktoranta. Skuteczność opracowanych metod porównano z tradycyjnymi algorytmami, które wybierają węzeł nadrzędny na podstawie sztywno określonego interwału czasowego lub zużycia energii. Badania wykazały, że podejście bazujące

na dynamicznym dostosowaniu wyboru węzła nadrzędnego do poziomu energii prowadzi do bardziej optymalnego wykorzystania zasobów. Algorytmy opracowane przez doktoranta zostały bardzo szczegółowo opisane, a poprawność ich działania została potwierdzona w prowadzonych badaniach, z zastrzeżeniem oparcia wyników na uproszczonym modelu, na co zwrócono uwagę w rozdziale 3 recenzji. W doktoracie także oszacowano złożoność obliczeniową (czas wykonania) poszczególnych algorytmów, co pozwala oszacować wpływ realizacji obliczeń na wydłużenie procesu relokacji. Potwierdza to, że praca rozszerza stan wiedzy w zakresie zarządzania energią w sieciach sensorowych.

Całość prowadzonych badań opisanych w rozprawie doktorskiej opiera się na pomiarach zużycia energii przeprowadzonych w sieciach działających w oparciu o 2 standardy transmisji danych: IEEE 802.15.4 oraz LoRa oraz modelu symulacyjnym (nazywanym w pracy obliczeniowym). W ocenionej pracy nie zastosowano metod analitycznych do oceny efektywności badanych metod wyboru węzła nadrzędnego w klastrze. Model obliczeniowy opracowany przez doktoranta ma stosunkowo niewielką złożoność (np. nie odzwierciedla zmienności zużycia energii w zależności od warunków transmisji, nie obejmuje retransmisji pakietów w przypadku zakłóceń), a doktorant nie zastosował istniejących narzędzi do symulacji zdarzeń dyskretnych lub modeli odzwierciedlających transmisję pakietów, jak np. OMNeT++ lub NS3. Oszacowanie efektywności przeprowadzono dla stosunkowo małych sieci, składających się z maksymalnie 10 węzłów. Wyniki przedstawione w pracy nie pozwalają potwierdzić, czy zaproponowane algorytmy działałyby efektywnie w bardziej złożonych sieciach, obejmujących setki lub tysiące węzłów, co ogranicza znaczenie zrealizowanych badań dla świata naukowego. Zawarto natomiast rozdział opisujący złożoność obliczeniową proponowanych algorytmów, którą poprawnie oszacowano na podstawie złożoności wiodących operacji wykonywanych w ramach tych algorytmów (np. sortowanie lub rozwiązywanie układów równań). Poprawnie uwzględniono w oszacowaniu złożoności obliczeniowej możliwość zastosowania różnych metod rozwiązywania układów równań, w tym najczęściej stosowanych metod Gaussa-Seidla i Cramera.

Bibliografia rozprawy zawiera jedną publikację w czasopiśmie Sensors przygotowaną wspólnie przez doktoranta i promotora, opisującą część ze zrealizowanych badań. Doktorant jest także współautorem 3 innych publikacji w tym samym czasopiśmie, w tym dwóch obejmujących zbliżoną tematykę badawczą dotyczącą redukcji ilości danych transmitowanych w sieciach sensorowych. Potwierdza to, iż doktorant jest w stanie realizować prace badawczo-rozwojowe, których wyniki są publikowane w czasopismach międzynarodowych.

7. Możliwość praktycznego zastosowania wyników badań

Algorytmy dynamicznej selekcji węzła nadrzędnego zaproponowane w pracy magistra Marcina Lewandowskiego mają szerokie możliwości praktycznego zastosowania w bezprzewodowych sieciach sensorowych. Ich głównym celem jest optymalizacja zarządzania energią w węzłach, co skutkuje wydłużeniem czasu życia całej sieci. Jest to istotny aspekt pozwalający obniżyć koszty utrzymania sieci sensorowej, dzięki zmniejszeniu liczby koniecznych wymian baterii. Algorytmy tego typu mogą znaleźć zastosowanie m.in. w sieciach monitorujących natężenie ruchu drogowego, monitorujących środowisko czy systemach bezpieczeństwa i nadzoru.

8. Uwagi krytyczne i pytania dotyczące rozprawy

Opis konfiguracji węzłów sieci podczas eksperymentów i pomiarów zużycia energii przez węzły sieci LoRa nie jest wystarczająco precyzyjny. Jaki był rozmiar przesyłanych pakietów i jak często były wysyłane? Zgodnie ze specyfikacją techniczną układu Murata CMWX1ZZABZ, użytego przez doktoranta do realizacji badań, pobór prądu podczas nadawania może wynosić od 34mA do 128mA, dlatego bardzo istotne jest wskazanie, jakiego współczynnika rozpraszania (ang. spreading factor) i jakiej mocy nadawania użyto podczas transmisji. Czy parametry te były stałe podczas eksperymentów, czy były regulowane przez algorytmy dobierające je do aktualnych warunków propagacji sygnału radiowego? Dla jakiej liczby pomiarów wyznaczono średnie zużycie energii i jaka była zmienność zużycia energii?

Na zużycie energii przez węzły pośredniczące w transmisji (węzły nadrzędne w klastrze) istotny wpływ ma sposób nasłuchu oraz ilość odebranych pakietów. Jeżeli węzeł nasłuchuje przez cały czas, zużycie energii jest znacznie większe, niż w przypadku nasłuchu próbkowanego, w którym węzeł włącza odbiornik radiowy tylko okresowo, w zadanych przez protokół momentach. Taki mechanizm np. zastosowano w trybie Relay standardu LoRaWAN, w którym węzeł pośredniczący domyślnie co 1s próbuje wykryć transmisję preambuły przez czas rzędu pojedynczych milisekund. Analogicznie, istotny wpływ na zużycie energii przez węzeł nadrzędny ma liczba węzłów końcowych, dla których konieczne jest odebranie danych i zagregowanie w celu przesłania dalej. Jak ten rozmiar wpłynął na zużycie prądu węzłów podczas eksperymentów?

Wedle informacji na stronie 66, dla sieci LoRa zdecydowano, że krok pracy będzie odpowiadał jednej sekundzie. Czy oznacza to, że wszystkie węzły w klastrze przesyłały dane do węzła nadrzędnego co 1s, z zastrzeżeniem założonego prawdopodobieństwa transmisji? Jaki odsetek pakietów transmitowanych przez nadawcę docierał lub był skutecznie odbierany przez węzeł nadrzędny podczas realizowanych pomiarów zużycia energii?

W pracy nie podjęto analizy skalowalności opracowanych algorytmów, a badania są przeprowadzone dla maksymalnie 10 węzłów w klastrze. Jaki jest narzut energetyczny związany z przesyłaniem zmian konfiguracji do węzłów klastra i czy możliwe jest oszacowanie, dla jakiej wielkości sieci stosowanie algorytmu przestaje być opłacalne?

Przy założonym zerowym koście zmiany konfiguracji węzłów, optymalnym rozwiązaniem jest przedzielenie roli węzła nadrzędnego w sposób proporcjonalny za każdym razem węzłowi z najwyższą dostępną energią w danej chwili czasu. Proszę o wskazanie, jak taka strategia ma się do badanych w pracy algorytmów?

Wykresy prezentujące zużycie energii zawarte w rozdziale 6.3 rozpoczynają się od arbitralnie przyjętej chwili czasu (dla części z wykresów jest to 750 minuta, dla części 250 minuta, a dla części 2000 minuta), pomijając początek czasu pracy urządzeń. Jakie było zużycie energii w początkowym czasie symulacji?

Przeprowadzone badania porównują opracowaną metodę wyboru węzła nadrzędnego w klastrze z innymi metodami opartymi na tej samej koncepcji, tj. agregacji danych przez 1 węzeł w grupie. Jak wyniki oszacowania zużycia energii mają się do czasu życia sieci w przypadku zastosowania bezpośredniej transmisji do stacji bazowej, tak jak ma to miejsce w sieci LoRaWAN?

9. Podsumowanie i ocena końcowa

Praca doktorska pt. „Algorytmy dynamicznej selekcji węzła nadrzędnego w celu wydłużania czasu życia bezprzewodowej sieci sensorowej” przygotowana przez Pana magistra Marcina Lewandowskiego potwierdza jego zdolność do realizacji badań naukowych. Doktorant poprawnie postawił tezę pracy, zaplanował i zrealizował szereg badań, które pozwoliły tą tezę potwierdzić. Opis metodologii prowadzonych badań jest w pewnych elementach nieprecyzyjny, a zastosowany model uproszczony, jednak zakres zrealizowanych badań potwierdza, że doktorant był w stanie przeanalizować wybrane zagadnienie i zaproponować nowe algorytmy rozwiązujące postawiony problem. Praca tym samym potwierdza, iż kandydat posiada wymaganą wiedzę teoretyczną w dyscyplinie Informatyka.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Pana magistra Marcina Lewandowskiego spełnia warunki określone w art. 187 ust. 1 i 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 r., poz. 1668 z późn. zmianami) i wnioskuję o dopuszczenie Pana magistra Marcina Lewandowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

6.03.2025

.....
data sporządzenia recenzji

.....
podpis recenzenta