

Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej  
Polskiej Akademii Nauk



Rozprawa doktorska pt.

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

mgr Anna Strzoda

Promotor: dr hab. inż. Krzysztof Grochla, prof. IITiS PAN

Promotor pomocniczy: dr inż. Konrad Połys

Gliwice, 2024

# Spis treści

<b>1</b>	<b>Wprowadzenie</b>	<b>4</b>
1.1	Cele pracy . . . . .	7
1.1.1	Teza pracy . . . . .	8
1.2	Metodologia badawcza . . . . .	8
1.3	Wkład do stanu wiedzy . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Stan wiedzy w zakresie komunikacji wieloskokowej w sieciach LPWAN</b>	<b>15</b>
2.1	LoRa . . . . .	15
2.2	LoRaWAN . . . . .	17
2.3	Przegląd literatury . . . . .	20
2.4	Reprezentacja sieci za pomocą grafu . . . . .	27
2.4.1	Urządzenia sieci . . . . .	28
2.4.2	Właściwości urządzeń sieci . . . . .	28
2.4.3	Połączenia pomiędzy urządzeniami . . . . .	29
<b>3</b>	<b>Analiza efektywności sieci LoRa</b>	<b>30</b>
3.1	Prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu . . . . .	32
3.1.1	Identyfikacja węzłów o ograniczonej łączności z siecią . . . . .	36
3.2	SNR . . . . .	42
3.3	Podsumowanie . . . . .	45
<b>4</b>	<b>Środowisko ewaluacji efektywności metod wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących</b>	<b>47</b>
4.1	Model symulacyjny . . . . .	47
4.1.1	Architektura modelu symulacyjnego . . . . .	48
4.1.2	Parametry modelu . . . . .	51
4.1.3	Modelowanie zużycia energii urządzenia . . . . .	52
4.2	Metryka efektywności metod wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących . . . . .	52
4.3	Eksperymenty symulacyjne . . . . .	53
4.3.1	Generowanie topologii sieci . . . . .	54
4.3.2	Scenariusze eksperymentów . . . . .	55

<b>5</b>	<b>Metoda wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących z indywidualnym przyporządkowaniem</b>	<b>59</b>
5.1	Sformułowanie problemu . . . . .	59
5.2	Analiza budżetu energii urządzenia . . . . .	60
5.3	Graf potencjalnych węzłów pośredniczących . . . . .	63
5.3.1	Funkcja wagi . . . . .	63
5.4	Funkcja celu optymalizacji . . . . .	67
5.5	Algorytm heurystyczny . . . . .	69
5.5.1	Złożoność obliczeniowa . . . . .	77
5.6	Wyniki . . . . .	81
5.7	Podsumowanie . . . . .	89
<b>6</b>	<b>Adaptacyjna metoda wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w zmiennych warunkach</b>	<b>91</b>
6.1	Analiza budżetu energii urządzenia . . . . .	91
6.1.1	Funkcja oceny węzła do działania w trybie relay . . . . .	93
6.2	Algorytm zachłanny . . . . .	95
6.2.1	Mechanizm weryfikacji bieżącego przyporządkowania . . . . .	95
6.2.2	Graf potencjalnych węzłów pośredniczących . . . . .	97
6.2.3	Wybór lokalizacji węzłów pośredniczących . . . . .	98
6.2.4	Złożoność obliczeniowa . . . . .	100
6.3	Wyniki . . . . .	103
6.4	Węzły pośredniczące z redundancją . . . . .	113
6.4.1	Funkcja oceny węzła do działania w trybie relay . . . . .	114
6.4.2	Wybór lokalizacji węzłów pośredniczących z redundancją	115
6.4.3	Rezultaty algorytmu wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących z redundancją . . . . .	116
6.5	Podsumowanie . . . . .	118
<b>7</b>	<b>Podsumowanie</b>	<b>121</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>136</b>
	<b>Spis rysunków</b>	<b>141</b>
	<b>Spis tablic</b>	<b>143</b>
	<b>Dodatek</b>	<b>144</b>

# Rozdział 1

## Wprowadzenie

Internet Rzeczy (ang. Internet of Things, IoT [1]) to koncepcja stworzenia sieci obiektów fizycznych (rzeczy) w celu wymiany danych i sterowania urządzeniami za pośrednictwem sieci Internet. Kluczowym dla realizacji tej wizji jest zapewnienie taniej i efektywnej energetycznie technologii transmisji bezprzewodowej. Rozwój technologii bezprzewodowej transmisji danych pozwolił na opracowanie takich metod komunikacji, określanych jako sieci rozległych niskiej mocy (ang. Low-Power Wide-Area Network, LPWAN) [2, 3], zaprojektowanych w celu zapewnienia komunikacji na duże odległości przy niskim poborze energii i niskiej przepustowości. Technologie LPWAN zapewniają daleki zasięg (3–5 km na terenach miejskich i 10–15 km na terenach podmiejskich [4]) przy niskiej mocy nadawania, ale ich ograniczeniem jest niska przepustowość transmisji danych (zazwyczaj nie więcej niż kilkadziesiąt kbps) oraz duże opóźnienia, które mogą sięgać kilku sekund lub minut [2]. Stąd, sieci LPWAN są odpowiednie dla zastosowań Internetu Rzeczy, w których ilość danych niezbędnych do przesłania jest niewielka oraz dopuszczalne są duże opóźnienia transmisji. LPWAN szczególnie sprawdza się gdy możliwa jest duża tolerancja na opóźnienia, a niskie zużycie energii jest pożądane, jak np. w systemach telemetrii inteligentnych miast (ang. smart cities) [5, 6]. Wdrożenia sieci LPWAN charakteryzują się zastosowaniem urządzeń zasilanych baterią, przeznaczonych do działania przez długi czas (np. dziesięć lat [2, 7, 6]) bez konieczności ładowania lub wymiany baterii.

Liczba urządzeń IoT osiąga masową skalę. Zgodnie z raportem [8] szacuje się, że w 2030 roku całkowita liczba połączonych urządzeń IoT na świecie osiągnie około 32.1 miliarda. W odpowiedzi na potrzebę zapewnienia taniej łączności urządzeń IoT opracowano kilka standardów sieci LPWAN, w tym: LoRa (ang. Long Range) [9], NB-IoT (ang. narrowband IoT) [10] czy Sigfox [11]. Standardy Sigfox i LoRaWAN [12] (warstwa MAC) to dwie najczęściej stosowane technologie LPWAN działające w pasmach wolnych od licencji [13] poniżej 1 GHz. Z kolei NB-IoT i LTE Cat-M (ang. long-term evolution for machines) to technologie wdrażane przez operatorów komórkowych, które korzystają z infrastruktury i bazują na protokołach dedykowa-

nych dla sieci komórkowych oraz zazwyczaj działają w pasmach licencjonowanych. Sieci LPWAN opierają się na wymianie danych pomiędzy węzłami końcowymi będącymi tanimi urządzeniami wyposażonymi w czujniki lub moduły wykonawcze, najczęściej zasilanymi baterią, a bramami sieci o większej mocy obliczeniowej i stałym źródle zasilania.

Istotnym wyzwaniem w sieciach LPWAN jest problem występowania obszarów w sieci, w których zasięg jest ograniczony, tzn. miejsc, gdzie urządzenia nie są w stanie skutecznie komunikować się z siecią. Jak podaje Semtech [14] – dostawca oraz lider w rozwoju ekosystemu technologii LoRa – zjawisko to powszechnie występuje w sieciach LoRa [15] i może wynikać z wielu przyczyn, w tym z ograniczeń fizycznych, takich jak bariery architektoniczne czy ograniczenia związane z topografią terenu które zatrzymują lub osłabiają sygnał. Problem zapewnienia skutecznej komunikacji w całym obszarze działania sieci jest trudniejszy w zastosowaniach telemetrii, gdzie często liczniki (np. wodomierze) są umieszczone w piwnicach budynków mieszkalnych lub w betonowych studzienkach z metalową lub betonową pokrywą, co znacznie ogranicza zasięg skutecznej komunikacji radiowej. Aby zmniejszyć ryzyko wystąpienia w sieci obszarów, gdzie sygnał jest niedostępny, rozmieszczenie bram LoRa musi być dokładnie przemyślane i zaplanowane, co może być często trudnym zadaniem. Optymalne rozmieszczenie bram jest kluczowe dla zapewnienia ciągłości i niezawodności sieci, ale nawet najlepiej zaplanowane sieci mogą napotykać na trudności z pokryciem zasięgiem wszystkich obszarów sieci.

Klasycznym podejściem w celu zapewnienia zasięgu sieci na całym wskazanym obszarze jest zastosowanie planowania radiowego [16, 17, 18], w którym za pomocą modeli propagacji radiowej oraz testów w terenie oszacowuje się zasięg komunikacji dla zadanego rozmieszczenia stacji bazowych lub bram sieci. W szczególności w pracach [19, 20] zaproponowano rozwiązania wspierające proces planowania wdrożenia infrastruktury sieci LoRaWAN, wspomagające dobór liczby czy lokalizacji bram LoRa z uwzględnieniem danych geograficznych pochodzących z rzeczywistych map. Jednak proces planowania radiowego jest kosztowny i czasochłonny, a ze względu na ograniczoną dokładność odwzorowania ukształtowania terenu planowanie radiowe nie daje pełnej gwarancji poprawności oszacowania zasięgu sieci. Ponadto, zastosowanie planowania radiowego w technologii LoRa jest mniej efektywne niż w przypadku sieci komórkowych LTE i GSM, ponieważ ze względu na niewielki koszt punktu dostępowego (bramy) sieci LoRa nie jest kosztowo efektywne przeprowadzenie pracochłonnych analiz przed instalacją taniego węzła sieci. Dodatkowo w przypadku LoRa, technologii stosunkowo nowej i wciąż rozwijającej się, narzędzia i metody planowania mogą być mniej zaawansowane lub oparte na mniejszej ilości danych historycznych niż w przypadku LTE i GSM. Technologie komórkowe korzystają z dziesięcioleci badań [21, 22, 23], rozwoju i doświadczeń w projektowaniu sieci, co pozwala na optymalizację ich działania w szerokim zakresie warunków. Jednak nawet w dobrze planowanych

sieciach część urządzeń nie ma możliwości skutecznego dostarczenia danych ze względu na zjawisko interferencji czy występowanie przeszkód w postaci obiektów zwiększających tłumienność kanału transmisyjnego. Możliwym rozwiązaniem tego problemu jest zwiększenie zasięgu poprzez zastosowanie węzłów pośredniczących w transmisji (ang. relay), które mogą zebrać dane od sąsiednich węzłów i przesłać je do punktu dostępowego.

W odpowiedzi na wyzwania związane z ograniczonym zasięgiem w niektórych obszarach sieci oraz zmniejszenia kosztów rozbudowy infrastruktury sieci LoRa, w 2022 roku stowarzyszenie LoRa Alliance [24], odpowiedzialne m.in. za rozwijanie standardu LoRaWAN, opublikowało oficjalną specyfikację określającą sposób działania węzłów pośredniczących: relay [25]. Jest to dokumentacja techniczna, która zawiera szczegółowy opis zestawu protokołów i reguł umożliwiających przekazywanie ramek LoRaWAN między urządzeniem końcowym a siecią z wykorzystaniem urządzenia relay, a także wyjaśnia aspekty techniczne związane z konfiguracją i wymaganiami sprzętowymi urządzenia tego typu. Jednak specyfikacja nie odnosi się do kwestii rozmieszczenia urządzeń relay w sieci.

W niniejszej rozprawie doktorskiej przedstawiam metody wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących zapewniających efektywność energetyczną sieci. **Problem badawczy**, na który odpowiada rozprawa to znalezienie odpowiedzi na pytanie: „W jakich lokalizacjach w sieci LoRa umieścić węzły pośredniczące, aby zapewnić możliwie najlepszą efektywność energetyczną sieci?”. **Istotność problemu** wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa rośnie, ponieważ tematyka komunikacji wieloskokowej w sieciach LPWAN w ostatnich latach stała się obszarem zarówno badań naukowych [26, 27, 28, 29, 30] jak i stanowi przedmiot dyskusji w odpowiednich organizacjach standaryzacyjnych (LoRa Alliance [24]), co stanowi dodatkową motywację dla prowadzonych przeze mnie badań przedstawionych w rozprawie.

Dodatkowo, problem wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa, posiada istotne znaczenie praktyczne. W sieciach LoRaWAN w zastosowaniach telemetrii, gdzie liczniki (np. wodomierze) są najczęściej umieszczone albo w piwnicach budynków mieszkalnych albo w betonowych studzienkach, występowanie pewnego odsetka (kilka procent) urządzeń sieci o ograniczonej łączności z siecią, jest powszechnym problemem [15]. Jak podaje Semtech [14], możliwym rozwiązaniem problemu ograniczonej łączności urządzeń w sieci LoRa jest rozmieszczenie węzłów pośredniczących w odpowiednio wybranych, strategicznych lokalizacjach [15]. Zatem w zakresie metod poprawy zasięgu i niezawodności sieci bezprzewodowych, implementacja technologii relay stanowi alternatywę [31] dla metod bazujących na zwiększaniu liczby bram i/lub na zwiększeniu czułości odbiornika. W przypadku strategii zwiększenia liczby bram, należy mieć na uwadze, że to podejście wiąże się z koniecznością budowy bardziej złożonej infrastruktury, potencjalnie przewodowej (ze względu na np. konieczność dostępu do standardowego źródła zasilania), co może skutkować wzrostem kosztów instalacji i utrzymania sieci. Z kolei strate-

gia zwiększenia czułości odbiornika ma swoje konsekwencje w postaci niższej prędkości przesyłu danych. Tymczasem, w niniejszej rozprawie doktorskiej proponuję rozwiązanie, które zapewnia pokrycie białych plam zasięgu sieci praktycznie bezkosztowo. Jednocześnie, zaproponowane przeze mnie metody optymalizacji wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa otwierają nowe perspektywy, ponieważ dotychczas komunikacja w technologii LoRaWAN była realizowana wyłącznie bezpośrednio pomiędzy węzłem końcowym sieci a punktem dostępowym.

## 1.1 Cele pracy

Celem przeprowadzonych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej badań jest opracowanie nowych metod wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących (relay) w sieci LoRa, zoptymalizowanych pod względem zapewnienia możliwie najlepszej efektywności energetycznej sieci. W efekcie, sieć działająca w konfiguracji wskazanej przez wynik algorytmu ma charakteryzować się efektywnym energetycznie wykorzystaniem zasobów i możliwie najmniejszym zużyciem energii, co jest szczególnie istotne w kontekście urządzeń zasilanych baterią w zastosowaniach LoRaWAN w aplikacjach IoT.

Celem jest opracowanie strategii wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących obejmujących procedury znajdujące rozwiązanie zoptymalizowane pod względem minimalizacji zużycia energii w sieci, a w konsekwencji maksymalizacji czasu życia sieci oraz zapewniających niezawodność i zachowanie ciągłości operacyjnej poprzez maksymalizację żywotności baterii urządzeń. Zasadniczymi kwestiami są: sprostanie wyzwaniom związanym z zachowaniem ograniczeń dotyczących poziomu zużycia energii w urządzeniach, ze względu na zasilane baterią; wybór odpowiednich parametrów oraz ustalenie adekwatnych kryteriów w ramach rozwiązania zapewniającego efektywne zarządzanie energią w sieci przy zapewnieniu pełnego pokrycia niezależnie od lokalizacji i dla zróżnicowanego odsetka węzłów sieci, które wymagają przyporządkowania węzłów pośredniczących do utrzymania łączności z siecią.

Istotnym aspektem jest uwzględnienie zmienności warunków propagacji sygnału radiowego, która wskazuje na potrzebę opracowania rozwiązania zaadaptowanego do cyklicznego uruchamiania, w celu okresowej rekonfiguracji sieci w odpowiedzi na pogorszone warunki transmisji. Celem jest opracowanie metody umożliwiającej adaptacyjną zmianę przyporządkowania węzłów pośredniczących w sieci na podstawie analizy aktualnych wartości parametrów urządzeń (m.in. poziomu naładowania baterii urządzenia czy współczynnika SF), co pozwala na efektywne zarządzanie energią w sieci. W końcowej części rozprawy skupiono się na problemie wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących, uwzględniając dodatkowe ograniczenie w postaci redundancji, co miało na celu opracowanie koncepcji zapewniającej rozwiązanie tego zagadnienia.

W celu weryfikacji spełnienia założonych celów zaproponowane spostrzeżenia i metody zostały ocenione z wykorzystaniem środowiska ewaluacji me-

to wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa (opisanego w rozdziale 4) i w odniesieniu do znanej w literaturze metody [32].

Sposób realizacji postawionych celów został przedstawiony w niniejszej rozprawie, której układ treści jest następujący: rozdział 1 stanowi wprowadzenie do rozważanej problematyki, przedstawia kluczowe zagadnienia związane z tematem oraz opisuje cele pracy, metodologię badawczą i wkład do stanu wiedzy. W rozdziale 2 opisano specyfikę technologii LoRa i LoRaWAN oraz przedstawiono stan wiedzy w zakresie komunikacji wieloskokowej w sieciach LPWAN. W tym rozdziale wprowadzono także notację wykorzystaną w dalszej części pracy w celu precyzyjnego opisu rozważanych zagadnień. W rozdziale 3 opisano wyniki analiz zbiorów danych pochodzących z wielkoskalowych komercyjnych wdrożeń IoT w celu znalezienia odpowiedzi na pytanie, czy i w jakich okolicznościach występuje potencjał do zastosowań węzłów relay w sieci LoRa. Następnie, w rozdziale 4 zaprezentowano środowisko ewaluacji metod wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa wykorzystujące model symulacyjny oraz narzędzie symulatora zdarzeń dyskretnych OMNeT++. W rozdziałach 5 i 6 przedstawiono opracowane przeze mnie metody wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa. Metoda opisana w rozdziale 6 stanowi rozszerzenie prac względem metody opisanej w rozdziale 5 m.in. ze względu na uwzględnienie zmienności propagacji sygnału radiowego czy rozważań dotyczących zapewnienia redundancji w wyborze węzłów relay. Wyniki dla zaproponowanych metod uzyskane z wykorzystaniem środowiska ewaluacji opisanego w rozdziale 4 zostały przedstawione w rozdziałach poświęconych konkretnym metodom. W rozdziale 7 przedstawiono podsumowanie prac oraz wyników zaprezentowanych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej.

### 1.1.1 Teza pracy

Na podstawie analizy problemu badawczego oraz wyników przeprowadzonych badań przedstawionych w niniejszej rozprawie doktorskiej, postawiono następującą tezę rozprawy:

Odpowiedni dobór lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa poprawia efektywność energetyczną sieci.

## 1.2 Metodologia badawcza

W ramach przeprowadzonych badań wykonano analizę stanu wiedzy w zakresie komunikacji wieloskokowej w sieciach LPWAN, co stanowiło fundament dla zdefiniowania celu i przedmiotu badań oraz sformułowania problemu badawczego. Dodatkowo, przegląd dotychczasowych osiągnięć naukowych w wybranym obszarze badawczym miał znaczenie w wyborze odpowiedniej metody odniesienia, w celu porównania zaproponowanego przeze mnie rozwiązania z rozwiązaniem już istniejącym w literaturze naukowej.



W ramach pracy nad projektowaniem algorytmów wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa, przeprowadzono analizę danych pochodzących z rzeczywistych, wielkoskalowych i komercyjnych wdrożeń IoT, działających w technologii LoRa. Zbiór danych został pozyskany w ramach prac w projekcie badawczo-rozwojowym SCIoT (7) i uwzględnia pomiary dotyczące transmisji pochodzące z infrastruktury sieci LoRa złożonych z kilku tysięcy urządzeń i wdrożonych w dwóch polskich miastach. Zestaw danych zawiera kompleksowy i unikatowy zbiór pomiarów, który – według mojej najlepszej wiedzy – nie został jak dotąd opisany w literaturze naukowej. Zbiór danych został poddany analizie w kontekście różnych metryk oceny efektywności sieci, wskazanych w pracy [33]. Szczególną uwagę poświęcono prawdopodobieństwu dostarczenia pakietu, z uwagi na jego istotność w procesie ustalenia, czy i w jakich okolicznościach istnieje potencjał do zastosowania urządzeń relay w sieci LoRa.

Praca z danymi pochodzącymi z rzeczywistych wdrożeń pozwala na lepsze zrozumienie charakterystyk środowiska działania sieci LoRa oraz budowania ekspertyzy przydatnej w projektowaniu algorytmów dla zastosowań w tej technologii. Ponadto, co szczególnie ważne w kontekście postawionego problemu badawczego, w ramach przeprowadzonej analizy danych zidentyfikowano występowanie problemu związanego z ograniczoną bezpośrednią łącznością z punktem dostępowym dla pewnego odsetka urządzeń końcowych sieci. Wyniki analizy wskazują na zgodność z założeniami dostawcy technologii LoRa – Semtech [14] – dotyczącymi występowania kilku procent urządzeń w sieci posiadających ograniczoną bezpośrednią łączność z punktem dostępowym [15]. Potwierdza to istotność postawionego problemu badawczego dotyczącego wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci, niezbędnych dla zapewnienia niezawodności transmisji dla urządzeń o ograniczonej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym.

W procesie rozwiązywania problemu wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa, początkowo opracowano strategię, która realizuje przyporządkowanie, w którym każde urządzenie relay zostaje przypisane do obsługi dokładnie jednego urządzenia o ograniczonej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym. W kolejnych etapach prac skupiono się na opracowaniu bardziej kompleksowego rozwiązania, które unika niepotrzebnej nadmiarowości w liczbie lokalizacji węzłów sieci wskazanych do działania w trybie relay, przy zapewnieniu pełnego pokrycia dla urządzeń o ograniczonej łączności z siecią. Dodatkowo, rozwinięte podejście uwzględnia nowy mechanizm zaprojektowany do cyklicznego uruchamiania, w celu okresowej rekonfiguracji sieci w odpowiedzi na pogorszone warunki propagacji sygnału radiowego. W końcowym etapie prac zaproponowano koncepcję rozwiązania dla problemu wyboru lokalizacji węzłów relay z dodatkowym ograniczeniem w postaci zapewnienia redundancji.

W celu oceny skuteczności opracowanych metod wykorzystano środowisko ewaluacji efektywności metod wyboru lokalizacji węzłów relay opisane w

rozdziale 4. Uwzględnia ono wykorzystanie narzędzia środowiska symulacyjnego zdarzeń dyskretnych OMNeT++ umożliwiające ocenę potencjału zastosowania opracowanych rozwiązań w rzeczywistych warunkach sieciowych. Jako metodę referencyjną wykorzystano implementację algorytmu [32] ukierunkowanego na oszczędzanie energii i jednocześnie dobrze znaną metodę. Uwzględnia ona wielu kandydatów na węzły relay i wiele urządzeń o ograniczonej łączności z siecią wymagających przyporządkowania węzłów pośredniczących. Dodatkowo, metoda referencyjna ukierunkowana jest na minimalizację zużycia energii w urządzeniach. Metoda działa w oparciu o model aukcyjny [34], który uwzględnia egoistyczne zachowanie użytkowników, którzy ze względu na koszt energii związany z pośredniczeniem w transmisji nie są naturalnie skłonni do pełnienia funkcji węzłów relay w komunikacji dla węzłów o ograniczonej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym bez otrzymywania odpowiednich korzyści. Algorytm przypisuje jednemu węzłowi pośredniczącemu dokładnie jeden węzeł o ograniczonej łączności z siecią, co różni się od podejścia zaproponowanego w rozdziale 6, które unika niepotrzebnej nadmiarowości w liczbie węzłów sieci wskazanych do działania w trybie relay. Strategia przypisania węzłów relay w metodzie referencyjnej [32] sprowadza się do zastosowania metody [35] dla problemu przyporządkowania [36]. Istotną różnicę pomiędzy metodami zaproponowanymi w niniejszej rozprawie doktorskiej a metodą referencyjną stanowi m.in. kryterium oceny potencjału urządzenia końcowego sieci do działania w trybie relay oraz strategii przyporządkowania węzła pośredniczącego do konkretnego węzła o ograniczonej łączności z siecią.

W procesie ewaluacji metod uwzględniono scenariusze eksperymentów symulacyjnych z wykorzystaniem zarówno topologii sieci o losowym rozmieszczeniu węzłów, jak i tych opartych o dane pochodzące z rzeczywistych wdrożeń IoT. Skuteczność zaproponowanych metod została zweryfikowana pod względem różnych wartości odsetka urządzeń sieci, którym należy przyporządkować węzły pośredniczące oraz dla zróżnicowanego rozmieszczenia urządzeń o ograniczonej łączności z siecią. Efektywność opracowanych algorytmów została zbadana pod względem poziomu zużycia energii w całej sieci – metryki efektywności działania sieci wymienionej w znanej pracy [33]. Formalną definicję metryki opisano w rozdziale 4 dotyczącym ewaluacji metod (podrozdział 4.2, wzór (4.1)). Wnioski dotyczące skuteczności działania metod zostały wyciągnięte na podstawie statystyk z wyników symulacji zebranych dla kilkuset wariantów topologii sieci o rzeczywistym rozmieszczeniu węzłów w sieci oraz kilku tysięcy wariantów w pełni losowych topologii sieci.

### 1.3 Wkład do stanu wiedzy

Przeprowadzone w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej badania podejmują problematykę związaną z rozmieszczeniem urządzeń relay w sieci dla stosunkowo nowej i wciąż rozwijającej się technologii LoRa. Opublikowanie

oficjalnej specyfikacji funkcjonalności relay dla LoRaWAN przez organizację standaryzacyjną LoRa Alliance w 2022 roku potwierdza aktualność poruszanej w niniejszej rozprawie tematyki oraz istotność badań i optymalizacji w obszarze komunikacji z wykorzystaniem urządzeń relay w sieciach LPWAN. Ponadto, lider w rozwoju ekosystemu technologii LoRa – firma Semtech [14] – podkreśla, że rozwiązaniem problemu ograniczonej łączności urządzeń w sieci LoRa jest rozmieszczenie urządzeń relay w odpowiednio wybranych, strategicznych lokalizacjach [15]. Poza uzasadnieniem praktycznym, istotność problemu wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa rośnie, ponieważ tematyka komunikacji wieloskokowej w sieciach LPWAN w ostatnich latach została poruszona w badaniach naukowych [26, 27, 28, 29, 30].

Nowatorskość prac opisanych w niniejszej rozprawie doktorskiej polega na propozycji nowych technik obejmujących autorski zestaw kryteriów i metod optymalizacji wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa z uwzględnieniem charakterystyk i parametrów istotnych dla środowiska technologii LoRa w ujęciu ukierunkowanym na minimalizację zużycia energii w sieci oraz maksymalizację czasu życia sieci. W rozprawie zaproponowano nowe funkcje dla procedur optymalizacji wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa, gdzie głównym optymalizowanym zasobem jest energia, co istotne w kontekście zastosowań urządzeń zasilanych baterią w zastosowaniach LoRaWAN w aplikacjach IoT. Uwzględnione w ramach zaproponowanych metod kryteria optymalizacji pozwalają na zachowanie ograniczeń związanych ze zużyciem energii w urządzeniach, tak aby nie zmniejszyć pierwotnego przewidywanego czasu operacyjnego urządzenia sieci wskazanego do pełnienia funkcji węzła pośredniczącego. Odbywa się to z uwzględnieniem analizy wskaźników istotnych w kontekście zarządzania energią w sieci, np. poziomu naładowania baterii urządzenia oraz parametru SF (2.1) mającego wpływ na poziom zużycia energii podczas transmisji pakietu.

Współczynnik rozpraszania SF jest powiązany z warunkami propagacji sygnału radiowego, które mogą się zmieniać w trakcie działania sieci. W wyniku zmiennych warunków propagacji sygnału wartość parametru SF może ulegać modyfikacji. W związku z tym, początkowo wybrany zestaw lokalizacji węzłów pośredniczących, dobrany na podstawie określonej konfiguracji parametrów, może wymagać aktualizacji w późniejszym czasie działania sieci. W odpowiedzi na to wyzwanie zaproponowano mechanizm zaprojektowany do cyklicznego uruchamiania w celu okresowej rekonfiguracji sieci w odpowiedzi na zmienne warunki propagacji sygnału radiowego. Opracowany algorytm zapewnia możliwość wskazania takich węzłów pośredniczących, które zapewnią działanie sieci przez zadany czas, ograniczając ryzyko przerwania ciągłości operacyjnej spowodowane przedwczesnym wyczerpaniem baterii urządzenia. Zgodnie z moją najlepszą wiedzą, jest to pierwsze takie podejście do rozwiązania problemu wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa, co potwierdza wkład przeprowadzonych w niniejszej rozprawie doktorskiej badań w rozwój dyscypliny. Zaprezentowane w niniejszej rozprawie metody wyboru

lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa stanowią rozszerzenie prac [37, 38], których jestem współautorką.

Unikatowym elementem prac nad zaproponowanym rozwiązaniem jest zastosowanie połączenia optymalizacji z symulatorem zdarzeń dyskretnych iteracyjnie, podczas gdy zazwyczaj te metody stosowane są oddzielnie. Oznacza to, że wskazane przez metodę optymalizacji rozwiązanie, stanowi dane wejściowe do symulacji, a następnie wyniki symulacyjne, wykorzystywane są w kolejnym uruchomieniu metody optymalizacji. Proces ten powtarza się cyklicznie przez rozpatrywany czas działania sieci. Ocena efektywności zaproponowanych metod wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa została przeprowadzona poprzez serię eksperymentów z wykorzystaniem środowiska symulującego działanie sieci w konfiguracji uwzględniającej wynikowy zestaw lokalizacji węzłów relay wskazany przez zaproponowane metody. Zastosowanie symulacji komputerowych poprzedzające implementację rozwiązania w rzeczywistych warunkach pozwala na testowanie różnych scenariuszy konfiguracji sieci, identyfikację potencjalnych problemów oraz ograniczenie kosztów i ryzyka związanego z wdrożeniem. W ramach przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych uwzględniono scenariusze topologii sieci oparte na danych dotyczących rozmieszczenia węzłów w rzeczywistych wielkoskalowych wdrożeniach IoT działających w technologii LoRa w dwóch polskich miastach. Takie podejście umożliwia ocenę potencjału zaproponowanych metod do zastosowania w rzeczywistych warunkach działania sieci.

W niniejszej rozprawie zawarto rozważania dotyczące efektywności sieci LoRa, badając ją zarówno w kontrolowanym środowisku symulacyjnym jak i w oparciu o rzeczywiste dane pomiarowe uzyskane z rzeczywistych komercyjnych wdrożeń IoT złożonych z kilku tysięcy urządzeń. Zbiór danych stanowiący przedmiot prowadzonych przeze mnie analiz przedstawionych w rozprawie, został pozyskany w ramach realizacji prac w projekcie SCIoT (7) i jest, według mojej najlepszej wiedzy, niespotykany jak dotąd w literaturze, poza pracami [39, 40, 41, 42, 43], których jestem współautorką. Większość dostępnych prac analizujących efektywność sieci LoRa opisuje realizację badań w oparciu o symulacje lub zestawy pomiarów zebranych z wykorzystaniem platform testowych (obejmujących kilka fizycznych urządzeń), a nie na komercyjnych wdrożeniach obejmujących tysiące urządzeń rozlokowanych w zróżnicowanym terenie i działających w rzeczywistych warunkach.

**Opublikowane prace naukowe** Niniejsza rozprawa doktorska jest rozszerzeniem następujących opublikowanych prac naukowych, których jestem współautorką:

1. [37] A. Strzoda, K. Grochla, A Nature-Inspired Approach to Energy-Efficient Relay Selection in Low-Power Wide-Area Networks (LPWAN), *Sensors* 24 (11). doi:10.3390/s24113348.  
URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/11/3348>

2. [38] K. Grochla, A. Strzoda, R. Marjasz, P. Głomb, K. Książek, Z. Łaskarzewski, Energy-Aware Algorithm for Assignment of Relays in LP WAN, *ACM Trans. Sen. Netw.* 18 (4). doi:10.1145/3544561. URL <https://doi.org/10.1145/3544561>
3. [39] A. Strzoda, K. Grochla, A. Frankiewicz, Z. Łaskarzewski, Measurements and Analysis of Large Scale LoRa Network Efficiency, in: 2022 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC), 2022, pp. 818–823. doi:10.1109/IWCMC55113.2022.9824317

Pozostałe opublikowane przeze mnie prace naukowe:

4. [40] A. Strzoda, R. Marjasz, K. Grochla, How Accurate is LoRa Positioning in Realistic Conditions?, in: Proceedings of the 12th ACM International Symposium on Design and Analysis of Intelligent Vehicular Networks and Applications, DIVANet '22, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2022, p. 31–35. doi:10.1145/3551662.3561260
5. [44] R. Marjasz, K. Połys, A. Strzoda, K. Grochla, Improving Delivery Ratio in LoRa Network, in: Proceedings of the 19th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access, MobiWac '21, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2021, p. 141–146. doi:10.1145/3479241.3486698
6. [41] A. Strzoda, K. Grochla, P. Głomb, A. Madej, Link failure prediction in LoRa networks, in: 2023 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC), 2023, pp. 1310–1315. doi:10.1109/IWCMC58020.2023.10183185
7. [45] A. Strzoda, K. Grochla, K. Połys, Variability of BLE Advertisement Packets Received Signal Strength and Delivery Probability in the Presence of Interferences, in: Proceedings of the 12th ACM International Symposium on Design and Analysis of Intelligent Vehicular Networks and Applications, 2022, pp. 37–44
8. [43] R. Marjasz, A. Strzoda, K. Połys, K. Grochla, Mitigation of LoRa Interferences via Dynamic Channel Weights, in: Proceedings of the 35th annual European Simulation and Modelling Conference ESM 2021, 2021, pp. 150–154
9. [42] A. Strzoda, R. Marjasz, K. Grochla, LoRa Positioning in Verification of Location Data's Credibility, *Infocommunications Journal* 14 (4) (2022) 56–61
10. [46] R. Marjasz, K. Grochla, A. Strzoda, Z. Łaskarzewski, Simulation Analysis of Packet Delivery Probability in LoRa Networks, in: Computer Networks: 26th International Conference, CN 2019, Kamień Śląski, Poland, June 25–27, 2019, Proceedings 26, Springer, 2019, pp. 86–98

11. [47] A. Strzoda, Zastosowanie heurystyki do wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieciach LP WAN, *Przegląd Telekomunikacyjny+ Wiadomości Telekomunikacyjne*
12. [48] K. Grochła, R. Marjasz, K. Połys, A. Strzoda, Kolizje pakietów w Sieciach LoRa w Zastosowaniach Smart City, *Przegląd Telekomunikacyjny+ Wiadomości Telekomunikacyjne*
13. [20] A. Frankiewicz, A. Glos, K. Grochła, Z. Łaskarzewski, J. Miszczak, K. Połys, P. Sadowski, A. Strzoda, Lp wan gateway location selection using modified k-dominating set algorithm, in: *Modelling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems: 28th International Symposium, MASCOTS 2020, Nice, France, November 17–19, 2020, Revised Selected Papers 28*, Springer, 2021, pp. 209–223

# Rozdział 2

## Stan wiedzy w zakresie komunikacji wieloskokowej w sieciach LPWAN

### 2.1 LoRa

Rozprawa doktorska dotyczy doboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieciach wykorzystujących technologię LoRa. LoRa (ang. Long Range) jest technologią warstwy fizycznej łącza [2], która definiuje sposób modulacji sygnałów radiowych. Najczęściej jest stosowana w paśmie ISM poniżej 1 GHz (w zależności od rejonu może to być np. 868 MHz w Unii Europejskiej, 902-928 MHz w USA, 433 MHz w Azji). LoRa wykorzystuje techniki modulacji z widmem rozproszonym (ang. chirp spread spectrum, CSS) [49]. Komunikacja za pomocą modulacji LoRa jest może osiągać zasięg kilkunastu kilometrów [4] (w rekordowych przypadkach kilkaset kilometrów [50]), jednak ograniczenie stanowi szybkość transmisji danych (maksymalnie około kilkadziesiąt kbps).

Dlatego technologia LoRa znajduje zastosowanie w telemetrii, aplikacjach Internetu Rzeczy czy inteligentny miast (ang. smart cities) [51, 52, 53] wymagających przesyłania niewielkich ilości danych na dalekie odległości.

#### Współczynnik rozpraszania

Współczynnik rozpraszania (ang. spreading factor, SF) to jeden z kluczowych parametrów transmisji w technologii LoRa, mający wpływ na poziom zużycia energii urządzenia podczas transmisji pakietu i może przyjmować wartości ze zbioru  $\{7, 8, 9, 10, 11, 12\}$ . Wyższa wartość współczynnika SF oznacza większą odporność na interferencje i szum, co skutkuje większym zasięgiem komunikacji oraz zwiększa szansę na skuteczne dostarczenie danych do punktu docelowego bez przekłamań, nawet w środowisku z dużą ilością zakłóceń [54]. Z kolei niższa wartość współczynnika SF zapewnia mniejsze zużycie energii ze względu na krótszy czas trwania transmisji.

Różne wartości współczynnika SF prowadzą do znaczących różnic w czasie trwania sygnału w eterze (ang. Time on Air, ToA) podczas transmisji pojedynczego symbolu. Dla  $SF=n$ , szybkość transmisji bitów jest dana przez  $R_b^n = n \cdot \frac{1}{2^n/BW}$ , więc czas trwania symbolu w eterze wynosi  $T_{symbol} = \frac{2^n}{BW}$  [54]. W związku z tym, gdy współczynnik SF zwiększa się o jeden, czas transmisji symbolu ToA podwaja się.

Wartość współczynnika SF może zostać manualnie skonfigurowana dla poszczególnych urządzeń przez operatora sieci lub podlegać regulacji w trakcie działania sieci dzięki mechanizmowi ADR (ang. adaptive data rate) [55] dynamicznego dostosowania szybkości transmisji, mocy nadawania w zależności od warunków propagacyjnych.

### Duty–cycling

W kontekście urządzeń niskiego poboru mocy działających w technologiach LPWAN, ograniczenie zużycia energii osiągane jest za pomocą minimalizacji czasu pracy urządzeń z wykorzystaniem mechanizmów ang. duty cycle [56]. W technologiach Sigfox, LoRa czy NB–IoT urządzenia końcowe przez większość czasu pozostają w trybie uśpienia poza okresami aktywnej pracy, co redukuje zużycie energii i przekłada się na długą żywotność baterii urządzeń. Mechanizm ograniczenia cyklu pracy (ang. duty–cycling) został wprowadzony aby ograniczyć czas zajęcia pasma radiowego przez pojedyncze urządzenie w pasmach ISM. Ograniczenie duty cycle jest zagadnieniem podlegającym regulacjom prawnym. Regionalne regulacje dotyczące współdzielenia pasma wprowadzają ograniczenia czasu, przez który urządzenie może transmitować, aby uniknąć nadmiernego obciążenia pasm radiowych. W przypadku technologii LoRa w europejskim paśmie ograniczenie duty cycle wynosi 1% [57, 58].

### Miary poziomu sygnału radiowego

**RSSI** (ang. received signal strength indicator) – wskaźnik mocy odbieranego sygnału radiowego. W sieciach LoRa najczęściej jest wyrażony w logarytmicznej jednostce miary mocy [dBm] odniesionej do mocy 1 mW [59]:

$$RSSI_{dBm} = 10 \log_{10} \left( \frac{P}{1 \text{ mW}} \right) \text{ [dBm]}, \quad (2.1)$$

gdzie  $P$  – moc sygnału.

**SNR** (ang. signal–to–noise ratio) – stosunek mocy sygnału użytecznego do mocy szumu tła [60]:

$$SNR = \frac{P_s}{P_N}, \quad (2.2)$$



gdzie  $P_s$  – moc sygnału użytecznego,  $P_N$  – moc szumu. Wskaźnik SNR wyrażony w decybelach przyjmuje następującą postać:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_s}{P_N} \right) \text{ [dB]} \quad (2.3)$$

### Szerokość pasma (ang. bandwidth, BW)

Ważnym parametrem działania sieci LoRa jest szerokość pasma wyrażona w [Hz]. Jest to szerokość zakresu częstotliwości fal radiowych wykorzystywanych do transmisji danych [61].

## 2.2 LoRaWAN

LoRaWAN (ang. LoRa Wide Area Network) jest protokołem sieciowym charakteryzującym się niskim zapotrzebowaniem na energię urządzenia wykorzystywanego do komunikacji [55].

### Topologia

Sieć LoRaWAN wykorzystuje topologię gwiazdy gwiazd (ang. star-of-stars) [62], gdzie bramy (ang. gateways) umożliwiają dwukierunkową (ang. bi-directional) komunikację pomiędzy urządzeniami końcowymi a centralnym serwerem sieciowym znajdującym się na zapleczu infrastruktury sieciowej. Urządzenia końcowe komunikują się z bramami przy użyciu jednoskokowej komunikacji radiowej (ang. single-hop radio-frequency, RF) z wykorzystaniem techniki modulacji LoRa. Bramy LoRa odbierają dane z urządzeń końcowych, a następnie przesyłają je do serwera sieciowego przy użyciu standardowego połączenia IP (ang. Internet Protocol). Z kolei brama LoRa, otrzymawszy dane z serwera sieciowego, wysyła je do urządzeń końcowych

W terminologii LoRaWAN ramki rozróżnia się na te transmitowane z urządzeń końcowych do serwera sieciowego za pośrednictwem bramy LoRa, określane jako transmisję w górę łącza (ang. uplink) oraz ramki przesyłane w przeciwnym kierunku, czyli z serwera sieciowego do urządzeń końcowych, określane jako transmisja w dół łącza (ang. downlink). Komunikacja zazwyczaj ma charakter dwukierunkowy, jednak przeważający ruch danych odbywa się od urządzenia końcowego do serwera sieciowego. Serwer sieciowy konsoliduje dane, które otrzymuje z bram i przesyła je na serwer aplikacji, który umożliwia wizualną lub analityczną interpretację danych.

Komunikacja pomiędzy urządzeniem końcowym sieci, a bramą odbywa się na różnych kanałach częstotliwości, co pozwala na optymalizację wykorzystania pasma i zmniejszenie ryzyka zakłóceń. Dostępne kanały mogą różnić się w zależności od regionu ze względu na lokalne regulacje [63].

## Klasy urządzeń

Standard LoRaWAN definiuje trzy klasy urządzeń końcowych A, B oraz C [55]. Wszystkie klasy umożliwiają dwukierunkową komunikację. Urządzenia końcowe transmitują dane do serwera za pośrednictwem bramki (ang. gateway) oraz odbierają od niego dane, wykorzystując okna (okresy czasu) transmisyjne i odbiorcze, odpowiednio. W przypadku klas A i B urządzenie końcowe w każdej chwili może wyjść z trybu uśpienia i transmitować dane gotowe do przesłania, jednak odbieranie informacji jest możliwe tylko w odpowiednim oknie czasowym po nadaniu. Urządzenia klasy A inicjują transmisję danych w dowolnym czasie. Po każdej transmisji w górę łącza, urządzenie automatycznie otwiera dwa krótkie okna odbiorcze. Jest to najbardziej podstawowy i energooszczędny tryb działania, przeznaczony dla aplikacji, które wymagają komunikacji z serwera w dół łącza krótko po wysłaniu przez urządzenie końcowe transmisji w górę łącza. Oprócz zachowania klasy A, urządzenia klasy B odbierają zaplanowane ramki rozgłoszeniowe (ang. beacons) od serwera, które pozwalają na otwieranie dodatkowych okien odbiorczych w zaplanowanym momencie czasu. Najmniej energooszczędną klasą urządzeń jest klasa C, charakteryzująca się największym poborem mocy przez niemalże ciągłe trwanie w trybie nasłuchu, z wyjątkiem momentów własnej transmisji.

## Ograniczenia wynikające z architektury urządzeń

W porównaniu do technologii komórkowych i sieci bezprzewodowych krótkiego zasięgu komunikacja w technologii LoRa/LoRaWAN wymaga przetwarzania mniej złożonych form falowych [2]. Umożliwia to zmniejszenie wymiarów urządzenia (ang. device footprint), szczytowych szybkości transmisji danych oraz wielkości pamięci, minimalizując tym samym złożoność sprzętową, a co za tym idzie – koszty. Dodatkowo, realizacja relatywnie złożonych obliczeniowo zadań takich jak eliminacja duplikatów czy dostosowanie parametrów transmisji (np. szybkość transmisji danych), aby utrzymać łączność w górę i w dół łącza, przeniesiona jest na infrastrukturę serwerową, co umożliwia projektowanie urządzeń końcowych sieci w sposób ekonomiczny i energooszczędny, stosując układy o niewielkiej wydajności przetwarzania danych i niskich częstotliwościach taktowania.

## Protokół dostępu do łącza

Protokół LoRaWAN wykorzystuje do dostępu do łącza (ang. media access control, MAC) wykorzystując metodę ALOHA [64]. ALOHA zakłada wysyłanie przez urządzenia końcowe danych w dowolnej chwili czasu. Głównym założeniem jest to, że każde urządzenie w sieci ma równy dostęp do medium transmisyjnego, ale jednocześnie może dojść do kolizji, jeśli wiele urządzeń próbuje nadawać jednocześnie. W roku 2023 wydana została specyfikacja rozszerzająca protokół LoRaWAN o metodę CSMA (ang. Carrier Sense Multi-

ple Access) dostępu do łącza, w której moment transmisji poprzedzony jest mechanizmem nasłuchu przez urządzenie. Urządzenie w przypadku wykrycia zajętości kanału, aby uniknąć kolizji, podejmuje próbę rozpoczęcia transmisji w innej chwili czasu lub na innym kanale [65].

### Model zużycia energii

W pracy stosuję model zużycia energii urządzenia końcowego podczas przesyłania i odbierania pakietu LoRa oparty na pracy [66]:

$$T_{symbol} = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (2.4)$$

$$T_{preamble} = T_{symbol} \times (n_{preamble} + 4.25) \quad (2.5)$$

$$A = \left\lfloor \frac{8PL - 4SF + 28 + 16 - 20H}{4(SF - 2DE)} \right\rfloor \quad (2.6)$$

$$Payload = 8 + \max(A \times (CR + 4), 0) \quad (2.7)$$

$$T_{payload} = Payload \times T_{symbol} \quad (2.8)$$

$$T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload}, \quad (2.9)$$

gdzie:

- $T_{symbol}$  – czas trwania pojedynczego symbolu w eterze (ToA pojedynczego symbolu);
- $BW = 125$  kHz – szerokość pasma (ang. bandwidth);
- $n_{preamble} = 8$  – liczba symboli kodujących preambułę (wartość określona w dokumencie „Regional Parameters LoRaWAN” [63] i rozszerzona o dodatkowe 4.25 symboli przez nadajnik radiowy, co daje 12.25 symboli);
- $PL = 51B$  – rozmiar właściwej wiadomości (ang. payload);
- $H = 0B$  – rozmiar nagłówka;
- $DE = 1$ , jeśli optymalizacja „low data rate” jest włączona (dla SF=11 i SF=12), w przeciwnym wypadku  $DE = 0$ ;
- $CR = 5$  – szybkość kodowania.

Wówczas, poziomy zużycia energii wykorzystanej na transmisję oraz nasłuch dla pojedynczego pakietu wyrażone są za pomocą następujących formuł:

$$E_{TX} = 37 \times T_{packet} \quad (2.10)$$

$$E_{RX} = 6.5 \times T_{packet} \quad (2.11)$$

Tablica 2.1: Poziom zużycia energii na transmisję oraz nasłuch dla pojedynczego pakietu w zależności od wartości współczynnika SF i dla wartości parametrów podanych w modelu zużycia energii 2.2.

SF	ToA [s] ( $T_{packet}$ )	$E_{TX}$ [mAs]	$E_{RX}$ [mAs]
7	0.118	4.366	0.767
8	0.215	7.955	1.3975
9	0.39	14.43	2.535
10	0.698	25.826	4.537
11	1.56	57.72	10.14
12	2.796	103.452	18.174

### Węzły pośredniczące w sieciach LoRaWAN

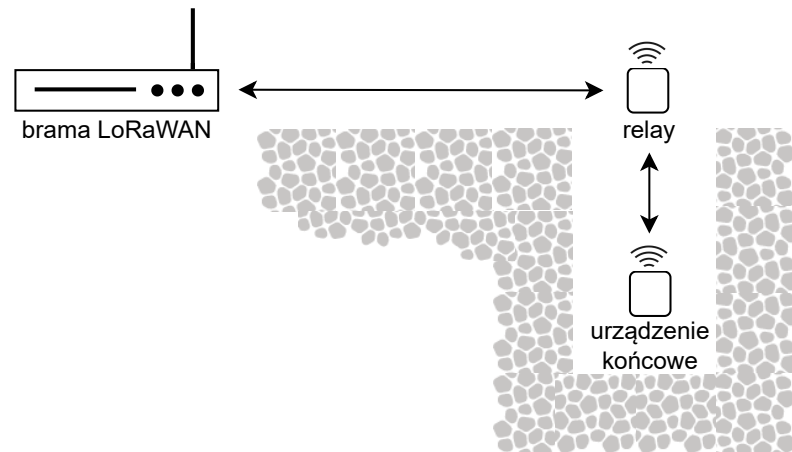
Węzeł pośredniczący (ang. relay) zwany także urządzeniem relay w sieci LoRa jest urządzeniem końcowym, które pełni funkcję pośrednika w komunikacji dwukierunkowej<sup>1</sup> między innymi urządzeniami końcowymi a bramą, wykorzystując protokół komunikacji LoRaWAN [25]. Urządzenia relay zazwyczaj są zasilane baterią, co zapewnia ich mobilność i ułatwia instalację w różnych lokalizacjach infrastruktury sieciowej. Architektura sprzętu urządzeń relay bazuje na podobnych komponentach co standardowe urządzenia końcowe w sieciach LPWAN. Reguły dotyczące komunikacji w obrębie sieci z wykorzystaniem funkcjonalności opisano w specyfikacji [25] opublikowanej w 2022 roku przez stowarzyszenie LoRa Alliance [24].

Zastosowanie urządzeń relay umożliwia rozszerzenie zasięgu sieci oraz zapewnienie łączności dla urządzeń o ograniczonej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym. Urządzenia relay mogą być szczególnie przydatne w zastosowaniach telemetrii, gdzie zapewnienie skutecznej komunikacji w całym obszarze działania sieci jest trudniejsze, ze względu na instalację czujników w piwnicach budynków mieszkalnych lub w betonowych studzienkach z metalową lub betonową pokrywą, co znacznie ogranicza zasięg skutecznej komunikacji radiowej.

## 2.3 Przegląd literatury

W literaturze dostępne są prace naukowe dowodzące możliwości zastosowania węzłów relay w sieciach LPWAN. W pracy [67] przedstawiono koncepcję węzła relay dla sieci LoRa. W ramach tej pracy zdefiniowano rozszerzenie protokołu LoRaWAN, pozwalające urządzeniom końcowym sieci na wykrywanie i

<sup>1</sup> W kontekście funkcjonalności relay w LoRaWAN, komunikacja dwukierunkowa oznacza, że urządzenie relay może nie tylko przesyłać dane od urządzenia końcowego do bramy/serwera sieciowego (w górę łącza), ale również odbierać i przekazywać dane z bramy do urządzenia końcowego (w dół łącza) [25].



Rysunek 2.1: Rysunek poglądowy ilustrujący ideę zastosowania urządzenia relay w celu utrzymania łączności z siecią urządzenia końcowego o słabej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym, zainstalowanego w studziennicy wodomierzowej [15].

nawiązywanie połączenia z węzłem kandydackim do działania w trybie relay. Jako rozszerzenie standardowej specyfikacji protokołu LoRaWAN wykorzystano technikę wielodostępu z podziałem czasowym (ang. Time-Division Multiple Access, TDMA). Wydajność zaproponowanego rozwiązania porównano ze standardowym jednoskokowym schematem komunikacji LoRaWAN. Wyniki eksperymentów dowodzą zwiększenia niezawodności komunikacji i rozszerzenia zasięgu sieci przy zachowaniu właściwości LoRaWAN pod względem efektywności energetycznej dla komunikacji z wykorzystaniem węzła typu relay.

W ramach prac [28, 29], autorzy rozważają model komunikacji wieloskokowej w celu rozwiązania problemu obniżonej jakości sygnału wynikającej z długodystansowej komunikacji przez kanały z zanikaniem (ang. fading channels). W ramach pracy przedstawiono mechanizm wyboru węzła relay w oparciu o analizę wyznaczonego w sposób analityczny współczynnika SNR w połączeniu pomiędzy urządzeniami: urządzenie końcowe – relay – brama LoRa. Zaproponowany algorytm znajduje przyporządkowanie, w którym urządzenie relay zostaje przypisane dokładnie jednemu urządzeniu o słabej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym LoRa maksymalizując wartości współczynnika SNR w połączeniu węzeł końcowy – relay – brama LoRa. W procesie ewaluacji zaproponowanego systemu komunikacji wieloskokowej przeprowadzono analizę współczynnika błędów bitowych (ang. bit error rate, BER), optymalizację alokacji współczynników: rozpraszania (SF) i mocy transmisji w sieci, aby zapewnić maksymalną wydajność pod względem przepustowości, współczynnika BER oraz prawdopodobieństwa pokrycia w sieci tj. szansy, że dany obszar lub punkt w sieci jest objęty zasięgiem (pokryciem) danego medium transmisyjnego. Wyniki symulacyjne i numeryczne pokazują, że zapropono-

wany system znacząco poprawia współczynnik BER i prawdopodobieństwo zakresu działania dla danego obszaru sieci, ale redukuje przepustowość w porównaniu do tradycyjnego systemu LoRa.

Autorzy pracy [68] proponują architekturę sieci wieloskokowej opartą na modulacji LoRa i równoczesnych transmisjach (ang. concurrent-transmissions, CT). Na drodze eksperymentu z wykorzystaniem komercyjnych podzespołów autorzy pokazują, że połączenie technologii LoRa z równoczesnymi transmisjami pozwala na stworzenie efektywnej komunikacji. Mimo równoczesnej transmisji pakietu przez wiele węzłów relay będących w zasięgu węzła źródłowego, poprawny odbiór pakietu jest możliwy, gdy któraś z transmisji pakietu charakteryzuje się wyższą mocą niż pozostałe. Ponadto, autorzy proponują podejście z zastosowaniem przesunięć w czasie transmisji pakietów przez węzły pośredniczące co zwiększa prawdopodobieństwo sukcesu transmisji względem klasycznego podejścia CT. Autorzy jednak nie rozważają problemu wyboru lokalizacji węzłów relay, lecz skupiają się wyłącznie na realizacji schematu komunikacji wieloskokowej z arbitralnie wyznaczonymi do działania w trybie relay węzłami sieci, zarówno w modelu symulacyjnym, jak i w poprzez ręczną konfigurację w eksperymentach z wykorzystaniem fizycznych urządzeń. Schemat komunikacji z uwzględnieniem węzłów pośredniczących w sieci LoRa przedstawiono także w pracy [69] opisującej protokoły przekazywania danych, z wykorzystaniem jednego oraz dwóch współpracujących węzłów relay. Autorzy badają wydajność w zakresie utraty danych i opóźnień dla zaproponowanych protokołów przekazywania danych w ustalonej konfiguracji urządzeń relay.

W pracy [70] przedstawiono propozycję schematu harmonogramowania transmisji w komunikacji z wykorzystaniem urządzeń relay w sieci działającej w technologii LoRa. Rolę urządzeń relay w rozpatrywanym systemie pełnią z góry ustalone węzły sieci. W pracy skupiono się głównie na analizie kolizji w kontekście proponowanego schematu przekazywania danych z wykorzystaniem urządzeń relay wcześniej skonfigurowanych do działania w tym trybie, a nie na problemie wyboru lokalizacji tych urządzeń w sieci. Prototyp systemu przetestowano w warunkach podziemnych (kopalni), gdzie docelowo miałyby służyć jako system wspomagający konieczne do przeprowadzenia potencjalnie niebezpieczne dla człowieka procesy (np. detonacja).

W ramach projektu P2P-SmarTest H2020 przedstawiono wykorzystanie komunikacji urządzenie-do-urządzenia (ang. device-to-device, D2D) w sieci LoRaWAN i opracowano protokół komunikacji wspomaganej przez sieć D2D [71]. Zbadano również wykorzystanie urządzeń relay w innych sieciach LPWAN np. w pracy [72] opisano wykorzystanie urządzeń relay zamontowanych na pojazdach w sieci NB-IoT, a przekazywanie danych z sieci LPWAN do komunikacji satelitarnej opisano w pracy [73]. Jednakże, prace te nie odpowiadają na pytanie, w jakich lokalizacjach w sieci umieścić węzły typu relay i jak je wdrażać w sieciach o dużych rozmiarach.

W pracy [74] zaproponowano schemat sterowania węzłem relay w sieci

LoRa z wykorzystaniem protokołu LoRaWAN jako model analityczny. Zaprezentowany schemat promuje przekazywanie danych z udziałem węzłów pośredniczących spośród urządzeń końcowych o niskim współczynniku SF z nastawieniem na zapewnienie jak największego pokrycia zasięgiem sieci oraz zwiększenia prawdopodobieństwa sukcesu transmisji dla urządzeń końcowych znajdujących się w obszarach oddalonych od punktu dostępowego. W zaproponowanym modelu uwzględniono strategię wyboru węzła relay opartą na wskaźniku mocy sygnału odebranego RSSI (2.1) oraz posłużono się teoretycznymi wartościami wskaźników SNR (2.2) i SIR (ang. signal to interference) dla porównania ze standardowym systemem komunikacji jednoskokowej tzn. nie uwzględniającej funkcjonalności relay. Mimo, że zaproponowane podejście zwiększa prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu o około 30%, to mechanizm ten nie uwzględnia wpływu funkcjonalności węzła relay na żywotność baterii urządzenia.

Niniejsze podejście zostało wykorzystane jako metoda referencyjna dla procedury [30] SF-Partition-Based Clustering and Relaying (SFPCR) realizującej wieloskokowy schemat komunikacji w sieci LoRa. W odpowiedzi na problem „near-far fairness” w kontekście sieci bezprzewodowych tzn. niejednakowej jakości usług systemu w zależności od odległości urządzenia końcowego do punktu dostępowego, autorzy prezentują wieloetapowy mechanizm zwiększający prawdopodobieństwo sukcesu transmisji. W pierwszej fazie mechanizmu obszar sieci podzielony zostaje na dwie strefy – tę o niskim oraz wysokim współczynniku SF w komunikacji pomiędzy węzłem końcowym a punktem dostępowym. Następnie, w strefie z wysokim współczynnikiem SF, urządzenia zostają podzielone na klastry skupiające węzły gęsto rozmieszczone w określonym obszarze. W obrębie każdego klastra wyznaczony zostaje węzeł pośredniczący w komunikacji pomiędzy węzłami znajdującymi się w obrębie tego klastra, a węzłem relay wyznaczonym w strefie sieci z niższą wartością współczynnika SF urządzeń. Wybór węzła relay oparty jest na kryterium średniej harmonicznej wskaźników: jakości łącza oraz teoretycznego pozostałego poziomu energii urządzenia. Jakość łącza szacowana jest w oparciu o: teoretyczne prawdopodobieństwo sukcesu transmisji wyznaczone na podstawie odległości między urządzeniami, wartości wskaźnika SNR oraz poziomu czułości urządzenia odbiorczego. Pozostały poziom energii urządzenia wyznaczany jest za pomocą różnicy pomiędzy energią początkową a wyznaczonym w sposób teoretyczny poziomem energii w danej chwili czasu. Urządzenie wypadające najlepiej, według rankingu średniej harmonicznej bazującej na wymienionych wskaźnikach, zostaje wybrane do pełnienia roli węzła relay. W procesie ewaluacji metody wykorzystano środowisko symulacyjne zdarzeń dyskretnych NS-3 [75] (ang. Network Simulator 3). Zarówno zaproponowany mechanizm jak i scenariusze symulacyjne zostały skonstruowane w oparciu o scenariusz topologii sieci z jednym punktem dostępowym. Urządzenia końcowe sieci rozmieszczone są zgodnie z rozkładem Gaussa w promieniu kilku kilometrów od punktu dostępowego zlokalizowanego w centrum. Wyniki sy-

mulacyjne wskazują na zwiększenie prawdopodobieństwa sukcesu transmisji o ponad 20% względem metody zaprezentowanej w [74].

Praca [27] wprowadza rozwiązanie realizujące energooszczędną komunikację w schemacie wieloskokowym w sieci LPWAN, bazujące na analizie odległości pomiędzy urządzeniami sieci. Strategia wyboru węzła relay polega na wyznaczeniu węzła znajdującego się w najmniejszej odległości od bramy spośród wszystkich sąsiednich węzłów znajdujących się w pewnym promieniu odległości od węzła, któremu należy przyporządkować węzeł relay. Eksperymenty symulacyjne obejmujące komunikację w dwóch różnych licencjonowanych pasmach częstotliwości w konfiguracjach jedno i wieloskokowych, wykazały, że zaproponowana metoda może osiągnąć oszczędność energii w zakresie 15%. Jednak model symulacyjny uwzględnia wyłącznie moduły LoRa klasy C czyli najbardziej kosztowną energetycznie klasę urządzeń. Urządzenia klasy C zapewniają stałą dostępność w trybie nasłuchu, w przeciwieństwie do urządzeń klasy A i B, które wychodzą z trybu uśpienia tylko w określonych oknach czasowych. Uwzględnienie wyłącznie urządzeń klasy C upraszcza modelowanie komunikacji wieloskokowej i protokołu komunikacyjnego, ponieważ nie wymaga zarządzania slotami czasowymi. Jednak takie uproszczenie może ograniczać uniwersalność i adaptacyjność algorytmu oraz prowadzić do niedoszacowania optymalizacji energetycznej, co istotne w projektowaniu energooszczędnych rozwiązań w sieciach LPWAN. Dodatkowo, autorzy przyjmują uproszczenie, że mniejsza odległość pomiędzy węzłami sieci gwarantuje mniejsze zużycie energii.

W pracy [76] autorzy demonstrują koncepcję systemu komunikacji uwzględniającą funkcjonalność urządzenia relay z wykorzystaniem dostępnych komercyjnych podzespołów.

Większość prac dotyczących wykorzystania węzłów relay w sieciach LPWAN nie omawia, jak powinno być dokonywane wybieranie lokalizacji węzłów relay w sieci i zakłada się prostą konfigurację ręczną, w której urządzenie relay jest wybierane do przekazywania wiadomości. W pracach [31, 77] przeanalizowano schemat komunikacji wieloskokowej z wykorzystaniem węzłów pośredniczących pod względem niezawodności w przekazywaniu danych. Wyniki eksperymentów uzyskano w środowisku symulacyjnym lub poprzez wykorzystanie fizycznych urządzeń (na niewielką skalę), w tym prototypu urządzenia relay zbudowanego z komercyjnych podzespołów.

W pracy [26] autorzy prezentują narzędzie służące do analizy wpływu różnych modeli wyznaczania tras przesyłania danych między urządzeniami w sieci LPWAN na efektywność energetyczną sieci. Bezpośrednia transmisja do punktu dostępowego została zastąpiona transmisją do bliższej w sensie odległości bramy nadrzędnej przy wyższych prędkościach transmisji i niższym zużyciu energii. Procedura wyznaczania tras zakłada hierarchiczną strukturę drzewiastą do przesyłania danych z urządzeń z oddalonych obszarów do urządzeń znajdujących się w lokalizacjach bliżej punktu dostępowego. W ramach przeprowadzonych badań autorzy rozważają komunikację wyłącznie w górę łą-



cza, a dane przekazywane są z wykorzystaniem techniki wielodostępu TDMA. Konkretnie, dla każdej pary urządzeń nadawczego oraz węzła relay) przedziały czasowe na transmisję pakietów są dane arbitralnie, a rozmiar tych przedziałów czasowych jest obliczany z uwzględnieniem najgorszego scenariusza tzn. przy założeniu najniższej prędkości transmisji danych i maksymalnej liczby agregowanych pakietów.

Dostępne są prace omawiające problematykę wyboru węzła relay w kontekście bezprzewodowych sieci czujników. W szczególności, w pracy [78] zaproponowano mechanizm przekazywania pakietów w bezprzewodowej sieci czujników, polegający na wyborze kolejnego węzła pośredniczącego w celu przekazania pakietu do węzła docelowego. Proponowane rozwiązanie formuluje problem jako proces decyzyjny Markowa (MDP), w którym decyzja dotycząca wyboru kolejnego węzła pośredniczącego w przekazywaniu pakietów zachodzi lokalnie w bieżącym węźle relay i jest zoptymalizowane pod względem minimalizacji opóźnień w dostarczeniu danych. Nie jest to bezpośrednio możliwe do zastosowania w sieciach LPWAN ze względu na wymagane wymiany sond, które zużyłyby dużo przepustowości ze względu na duży zasięg transmisji. W pracy [79] rozważono problem wyboru węzła relay w sieci bezprzewodowej zakładając pojedyncze źródło, pojedynczy cel oraz wiele węzłów jako kandydatów do działania w trybie relay. Autorzy prezentują mechanizm wyboru zestawu współpracujących urządzeń relay w celu minimalizacji całkowitego czasu transmisji ustalonej ilości danych. W pracy zbadano wpływ mocy transmisji na prawdopodobieństwo błędu bitowego (ang. BER) i wydajność spektralną (miara efektywności wykorzystania dostępnego pasma częstotliwości w komunikacji bezprzewodowej). Algorytm wyboru węzła pośredniczącego opiera się na minimalizacji współczynnika BER i maksymalizacji efektywności energetycznej. W pracy [80] przedstawiono propozycję algorytmu wyboru węzłów relay w sieciach bezprzewodowych. Jednak podejście to zakłada stosunkowo częstą komunikację między węzłami sieci a punktem dostępowym w celu wymiany informacji o stanie kanału, co nie jest możliwe w sieciach LPWAN ze względu na ograniczoną przepustowość.

W pracy [81] przedstawiono dwa protokoły przekazywania danych, określone jako protokoły adaptacyjnego przełączania czasowego (ATS) i adaptacyjnego przełączania czasowego adaptacyjnego podziału mocy (ATS-APS). W zaproponowanych protokołach urządzenie relay dynamicznie optymalizuje proporcje przełączania czasowego i podziału mocy w zależności od lokalnych warunków kanału między węzłami relay, bez zewnętrznej pomocy ze strony źródła lub miejsca docelowego. W pracy [82] zaproponowano hybrydowy schemat przekazywania energii z dekodowaniem i przekazywaniem pakietów dla dwukierunkowej komunikacji z wykorzystaniem urządzenia relay. Dwa węzły źródłowe wymieniają informacje przy pomocy jednego węzła relay. Głównym punktem proponowanego modelu jest wykorzystanie bezpośredniego połączenia między dwoma źródłami i zastosowanie techniki łączenia selektywnego w odbiornikach w celu zwiększenia zysku związanego z różnorodnością. Wydaj-

ność zaproponowanego podejścia jest oceniana pod względem prawdopodobieństwa wystąpienia awarii.

Autorzy pracy [83] prezentują rozwiązanie mające na celu maksymalizację efektywności energetycznej w sieci z wielodostępem z ortogonalnym podziałem częstotliwości (ang. orthogonal frequency-division multiple access, OFDMA) [84]) poprzez optymalizację przydzielania zasobów z uwzględnieniem alokacji mocy, podziału kanału przesyłowego na podnośne<sup>2</sup> i przypisaniu ich do poszczególnych urządzeń sieci umożliwiając jednoczesny dostęp dla wielu użytkowników oraz wyboru węzłów pośredniczących w komunikacji pomiędzy węzłem źródłowym a docelowym. Jednak wybór urządzenia relay dla obsługi węzła źródłowego dokonywany jest spośród węzłów sieci, które zostały desygnowane do tej roli w sposób arbitralny. Algorytm nie uwzględnia kryterium poziomu naładowania baterii urządzeń. Zadany problem optymalizacyjny mający na celu maksymalizację efektywności energetycznej w sieci z wieloma urządzeniami relay poprzez optymalizację alokacji podnośnych i mocy, autorzy rozwiązują z wykorzystaniem metody Dinkelbacha [86], funkcji dualnej Lagrange’a, warunków Karush–Kuhn–Tucker’a oraz metody węgierskiej [35].

Niektóre z prac badawczych analizują problem wyboru węzła relay zarówno w sieciach LPWAN, jak i sieciach komórkowych [87]. Autorzy pracy [32] proponują optymalizację przyporządkowania węzła relay opartą na modelu aukcyjnym. Model aukcyjny zapewnia zabezpieczenia dla użytkowników nie w pełni współpracujących, kosztem wprowadzenia dodatkowych kosztów obliczeniowych. W optymalizacji wykorzystywany jest algorytm Energy-Efficient Maximum Weighted Matching (EE-MWM). To podejście jest najbardziej podobne do metody zaprezentowanej w niniejszej pracy, ponieważ uwzględnia wiele węzłów kandydackich do działania w trybie relay i węzły wymagające przyporządkowania węzłów relay. Jednak mimo, że strategia wyboru węzłów relay ukierunkowana jest na oszczędzanie energii to proponowane podejście nie uwzględnia analizy poziomu baterii urządzeń, a jedynie kryteria oparte na odległości czy wskaźnikach takich jak SNR. Inne podejście, przedstawione w pracy [88], rozważa wybór węzła relay uwzględniając oszczędzanie energii. Proponowany algorytm, PRS-D2D, korzysta z metody węgierskiej do rozwiązania problemu przyporządkowania urządzenia do urządzenia w czasie wielomianowym. Jednakże, rozważana jest tutaj konfiguracja z antenami kierunkowymi. W pracy [89] przedstawiono teoretyczne rozważania dotyczące efektywności energetycznej sieci LoRa w topologiach gwiazdy oraz ang. mesh. w zależności od różnych konfiguracji parametrów (np. SF, szerokość pasma, moc nadawania). W przypadku dostosowania LoRa dla topologii mesh efektywność energetyczną przeanalizowano pod względem gęstości sieci oraz zasięgu. Zaprezentowane badania nie podejmują jednak problematyki wyboru

---

<sup>2</sup>podnośna, telekom. przebieg elektr. o częstotliwości zawartej w pasmie częstotliwości sygnału nadajnika (zwykle leżącej w górnej granicy pasma) niosący dodatkowe informacje [85]

lokalizacji węzłów relay w sieci.

Podsumowując, w literaturze dostępne są prace rozważające schemat komunikacji wieloskokowej w technologii LoRa ([68, 67, 69, 70, 31, 77]). W badaniach tych często nie rozpatruje się problemu wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących, (zwłaszcza w wielkoskalowych sieciach), a przedstawia propozycje i analizę wydajności reguł przekazywania danych czy harmonogramowania transmisji z wykorzystaniem urządzeń relay w ustalonych węzłach sieci. Zdecydowana większość tych prac została opublikowana przed wydaniem oficjalnej specyfikacji funkcjonalności relay dla LoRaWAN (która miała miejsce w 2022 roku) przez LoRa Alliance [25] dostarczającej opis protokołu komunikacji z wykorzystaniem węzłów pośredniczących w sieci LoRa.

Prace, w których badania koncentrują się na problemie wyboru węzłów sieci do działania w trybie relay bazują m.in. na kryterium odległości pomiędzy urządzeniami ([27]), konkretnie – jej minimalizacji w komunikacji źródło – relay – punkt dostępowy. Jednak bazowanie wyłącznie na kryterium odległości nie uwzględnia obecności przeszkód fizycznych, które mogą znacząco obniżać jakość sygnału, a w konsekwencji mieć negatywny wpływ na efektywność komunikacji. Stąd, wybór węzłów relay w sieci dokonywany jest także w oparciu o wskaźniki poziomu sygnału radiowego SNR, RSSI czy współczynnik SF związany z warunkami propagacji sygnału ([28, 29, 74, 32]). W pracy [30] w wyborze węzłów pośredniczących w sieci LoRa uwzględniono dodatkowo analizę teoretycznego poziomu energii urządzenia. Analiza poziomu energii w węzle pośredniczącym została także uwzględniona w pracy [26] prezentującej narzędzie do wyznaczania i oceny efektywności energetycznej tras przesyłu danych w schemacie komunikacji wieloskokowej w sieciach LPWAN. Jednak prace te nie badają, jak wybierać lokalizacje węzłów pośredniczących w wielkoskalowych sieciach LPWAN tj. złożonych w setki lub tysiące urządzeń. Zatem w dotychczasowych badaniach istnieją pewne obszary, które wymagają dalszego rozwinięcia, co stwarza przestrzeń do uzupełnienia obecnych rozwiązań i zaproponowania nowych podejść.

## 2.4 Reprezentacja sieci za pomocą grafu

Z uwagi na fakt, że rozważania przedstawione w niniejszej pracy dotyczą analiz opartych na strukturze i połączeniach między urządzeniami sieci, do jej reprezentacji posłużono się modelem grafowym, co stanowi standardowe podejście w literaturze [90]. Model grafowy to struktura powszechnie stosowana w kombinatoryce, gdyż wiele problemów optymalizacji kombinatorycznej opisyje się najbardziej naturalnie w terminach teorii grafów [91]. Urządzenia sieci reprezentowane są przez wierzchołki grafu, zaś relacje między urządzeniami (np. znajdowanie się we wzajemnym zasięgu) reprezentowane są za pomocą krawędzi łączących odpowiednie wierzchołki.

W niniejszej pracy topologia sieci reprezentowana jest przez nieskierowany

graf

$$G = (V, E), \quad (2.12)$$

gdzie  $V$  oraz  $E$  są zbiorami wierzchołków i krawędzi grafu, odpowiednio. Wierzchołki ze zbioru  $V$  reprezentują urządzenia końcowe sieci, a krawędzie ze zbioru  $E$  oznaczają zasięg komunikacji pomiędzy parą urządzeń reprezentowanych przez wierzchołki połączone krawędzią. Wierzchołki grafu reprezentujące urządzenia sieci określane są w dalszej części pracy także jako „węzły” sieci.

### 2.4.1 Urządzenia sieci

W pracy wyszczególniam kilka grup urządzeń sieci, dla których przyjmuję następujące oznaczenia:

1. Bramy LoRa (ang. LoRa gateways)  $B$  – zbiór bram/punktów dostępnych LoRa;
2. Urządzenia o słabej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym/bramą LoRa  $W \subset V$  – zbiór urządzeń końcowych, którym należy przyporządkować urządzenie typu relay w sieci;
3. Urządzenia o słabej bezpośredniej łączności z bramą LoRa  $U \subset V$  – zbiór urządzeń, którym zostało przyporządkowane urządzenie typu relay w sieci;
4. Urządzenia relay (węzły relay)  $R \subset V$  – zbiór urządzeń, które odbierają sygnały od urządzeń ze słabą bezpośrednią łącznością z bramą LoRa, reprezentowanych przez wierzchołki ze zbioru  $W \cup U$ , i przekazują te sygnały dalej, aby rozszerzyć zasięg transmisji 2.2;
5. Pozostałe urządzenia  $V \setminus (U \cup W \cup R)$  – zbiór pozostałych urządzeń końcowych sieci (węzłów końcowych sieci).

### 2.4.2 Właściwości urządzeń sieci

Każde urządzenie końcowe sieci reprezentowane jest przez wierzchołek  $v \in V$  w grafie  $G = (V, E)$  i posiada następujące własności będące atrybutami wierzchołka reprezentującego dane urządzenie:

1. Bieżący poziom naładowania baterii  $b_v$ , podany w miliamperosekundach (mAs);
2. Współczynnik rozpraszania (opisany w 2.1)  $SF_{vg_v} \in \{7, 8, 9, 10, 11, 12\}$  w komunikacji pomiędzy urządzeniem końcowym reprezentowanym przez wierzchołek  $v \in V$  a bramą LoRa  $g_v \in B$ ;

3. Pozostały czas operacyjny urządzenia  $t_v \in \mathbb{N}$ , tzn. pozostały czas, przez który urządzenie powinno działać, wyrażony w liczbie dni. Każde urządzenie końcowe wyposażone jest w baterię i ma określony czas pracy, który jest gwarantowany przez producenta. Producent jest odpowiedzialny za dostarczenie urządzenia z baterią o odpowiedniej pojemności, aby mogło ono działać przez określony czas, jak to jest określone w specyfikacji produktu.
4. Współrzędne GPS urządzenia (w przypadku topologii sieci opartych o dane pochodzące z rzeczywistych wdrożeń).
5. Współrzędne urządzenia w układzie kartezjańskim. W przypadku rzeczywistych topologii sieci współrzędne GPS przekształcane są na punkty na płaszczyźnie.

### 2.4.3 Połączenia pomiędzy urządzeniami

Krawędź występująca pomiędzy węzłami w grafie  $G = (V, E)$  oznacza, że odpowiadające tym wierzchołkom urządzenia znajdują się we wzajemnym zasięgu komunikacji. W praktyce oznacza to, że urządzenia mogą komunikować się za pomocą określonej technologii bezprzewodowej. W grafie  $G = (V, E)$  każdej krawędzi  $(v, w) \in E$ , przyporządkowana zostaje waga  $SF_{vw} \in \{7, 8, 9, 10, 11, 12\}$ , reprezentująca wartość współczynnika rozpraszania SF w komunikacji pomiędzy dwoma urządzeniami reprezentowanymi przez węzły  $v, w \in V$ . Wartość współczynnika SF estymowana jest na podstawie współrzędnych punktów lokalizacji (w układzie kartezjańskim) węzłów sieci i modelu propagacji sygnału radiowego.

Dla danego wierzchołka  $v \in V_i$  w grafie  $G_i = (V_i, E_i)$ ,  $N_{G_i}(v)$  oznacza zbiór sąsiednich wierzchołków węzła  $v$

$$N_{G_i}(v) = \{w : w \in V_i \wedge (v, w) \in E_i\} [92] \quad (2.13)$$

$$\deg_{G_i}(v) = |N_{G_i}(v)| [92] \quad (2.14)$$

# Rozdział 3

## Analiza efektywności sieci LoRa

W celu ustalenia potrzeby oraz warunków zastosowania węzłów pośredniczących w sieci LoRa badania w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej rozpoczęłam od analizy pomiarów dotyczących transmisji, pochodzących z komercyjnych, wielkoskalowych wdrożeń IoT działających w technologii LoRa w dwóch polskich miastach. Analiza pomiarów pochodzących z rzeczywistych wdrożeń sieci LoRa pozwala na lepsze zrozumienie charakterystyk środowiska działania sieci w budowaniu ekspertyzy, identyfikację problemów i wyzwań oraz weryfikację teoretycznych założeń.

**O zbiorze danych** Zbiór danych dotyczących transmisji pakietów w dwóch rzeczywistych wielkoskalowych i komercyjnych wdrożeniach sieci LoRa, złożonych z kilku tysięcy urządzeń gromadzących pomiary zużycia wody w sieci wodociągowej pozyskano w ramach realizacji projektu SCIoT „Dynamiczne środowisko komunikacji bezprzewodowej dla infrastruktury Internetu rzeczy inteligentnych miast – Smart City IoT” (7). Na potrzeby analizy sieci te oznaczono jako odpowiednio sieć A i B, obejmujące informacje o wykonanych transmisjach w dwóch analizowanych miastach. Jest to według mojej najlepszej wiedzy, unikatowy zbiór danych, nieopisany jak dotąd w literaturze naukowej, poza opublikowaną pracą [39], której jestem współautorką.

Informacje dotyczące analizowanych zbiorów danych pochodzących z rzeczywistych wdrożeń IoT sieci A i B zawarto w tabeli 3.1. Rozpatrywane topologie sieci składają się z około 6400 (w przypadku sieci A) i 4400 (w przypadku sieci B) urządzeń końcowych. W każdym z miast zainstalowano po 15 bram LoRa. Obszar objęty przez obie infrastruktury sieciowe obejmuje zarówno regiony miejskie, jak i podmiejskie. W tym zestawieniu urządzenia zostały zainstalowane przy wodomierzach i transmitowały dwa pakiety na dobę. Dane zostały zebrane w okresie 7 miesięcy w przypadku sieci A i 20 miesięcy w przypadku sieci B.

Zbiór danych z sieci A i B obejmuje łącznie ponad osiem milionów rekordów danych. Pojedynczy rekord odpowiada pojedynczemu odebranemu przez bramę LoRa pakietowi od węzła końcowego i zawiera następujące informacje

o transmisji:

- Numer identyfikacyjny węzła końcowego sieci, który wysłał pakiet;
- Współrzędne (w systemie WGS 84 [93]) węzła końcowego sieci, który wysłał pakiet;
- Numer identyfikacyjny bramy LoRa, która odebrała pakiet. Jeśli pojedynczy pakiet został odebrany przez więcej niż jedną bramę LoRa, informacja o tym uwzględniona jest w innych rekordach zbioru danych;
- Współrzędne (w systemie WGS 84 [93]) bramy LoRa, która odebrała pakiet;
- Wartość wskaźników RSSI (2.1) oraz SNR (2.2) z jakimi pakiet został odebrany przez bramę LoRa;
- Czas (z dokładnością do sekundy) odebrania pakietu przez bramę LoRa;
- Numer sekwencyjny pakietu.

Taka organizacja danych oraz dostępne informacje umożliwiają przeprowadzenie analizy wskazanych według pracy [33] typowych wskaźników oceny efektywności działania sieci LoRa takich jak np. SNR (2.2), RSSI (2.1) czy prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu oraz ich zależność od odległości czy zmienność w czasie, a także wyznaczenie modelu utraty ścieżki (ang. path loss [94]). W niniejszej rozprawie głównie skupiono się na analizie prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu, ze względu na jego istotność w ocenie potencjału zastosowania węzłów pośredniczących w sieci.

Tablica 3.1: Informacje dotyczące rzeczywistych wdrożeń IoT sieci A oraz B.

Sieć	A	B
Standard	LoRa	LoRa
Komercyjne wdrożenie	Tak	Tak
Obszar	40 km <sup>2</sup>	40 km <sup>2</sup>
Liczba urządzeń końcowych	6400	4400
Liczba bram LoRa	15	15
Czas zbierania danych	7 miesięcy	20 miesięcy
Liczba pomiarów	4 200 000	4 000 000

### 3.1 Prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu

W kontekście zagadnienia badanego w niniejszej rozprawie doktorskiej kluczowym elementem analizy danych jest oszacowanie prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu z urządzeń końcowych (węzłów końcowych) sieci. Wyznaczono ogólne prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu dla każdego z węzłów końcowych sieci oraz, w celu bardziej szczegółowej analizy, prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu z węzła końcowego sieci do każdej z bram LoRa indywidualnie. Wyznaczenie prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu do danej bramy LoRa jest możliwe dzięki uwzględnieniu redundancji w zbiorze danych pomiarowych tzn. uwzględnieniu informacji o odebraniu pojedynczego pakietu przez każdą z bram, która ten pakiet odebrała. Z kolei w przypadku ogólnego prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu należy zaznaczyć, że gdy pojedynczy pakiet został odebrany przez kilka bram LoRa, został on uwzględniony w obliczeniach tylko raz, a wszelkie duplikaty zostały pominięte.

Niech  $N$  będzie liczbą węzłów końcowych sieci,  $M$  liczbą bram LoRa, a  $n_i$  to liczba pakietów wysłanych przez  $i$ -ty węzeł końcowy. Liczba wysłanych pakietów radiowych  $n_i$  dla  $i$ -tego węzła sieci jest określana na podstawie numeru sekwencyjnego pakietu, o którym informacja jest dostępna w zbiorze danych pomiarowych.

Prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu  $p_i$  dla  $i$ -tego urządzenia końcowego wyznaczone jest za pomocą następującej formuły:

$$p_i = \frac{k_i}{n_i}, \quad \forall i \in 1, \dots, N, \quad (3.1)$$

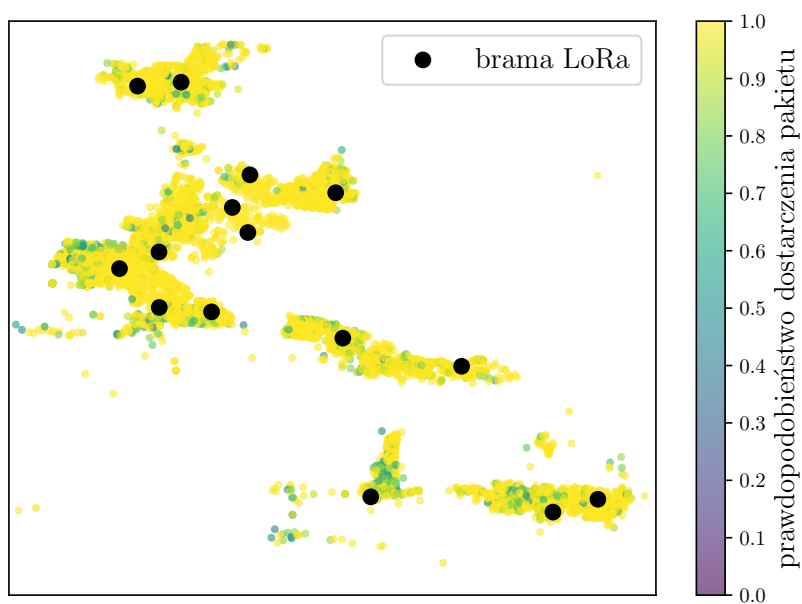
gdzie  $k_i$  to liczba pakietów dostarczonych z  $i$ -tego urządzenia końcowego do dowolnego punktu dostępowego LoRa.

Prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu z  $i$ -tego urządzenia końcowego do  $j$ -tej bramy LoRa wyznaczone jest za pomocą następującej formuły:

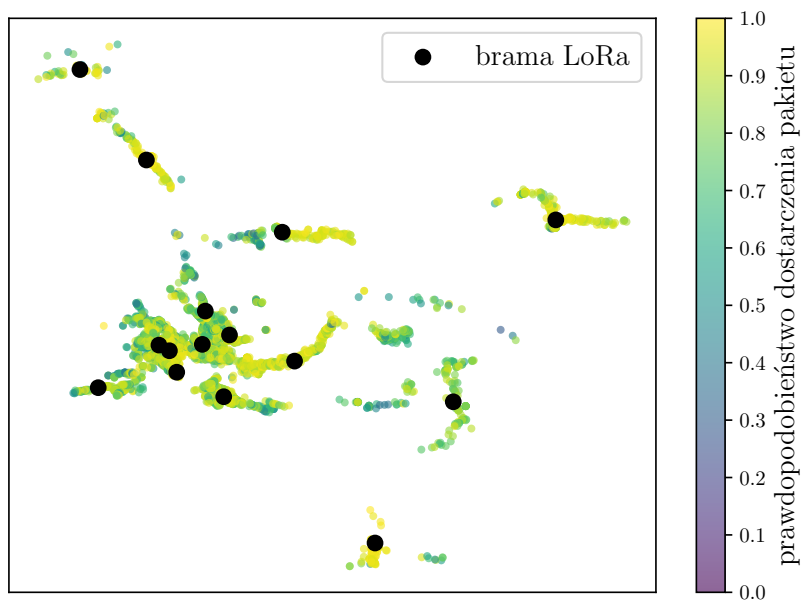
$$p_{ij} = \frac{k_{ij}}{n_i}, \quad \forall i \in 1, \dots, N, \forall j \in 1, \dots, M, \quad (3.2)$$

gdzie  $k_{ij}$  to liczba pakietów z  $i$ -tego urządzenia, które zostały odebrane przez  $j$ -tą bramę LoRa.





(a) sieć A



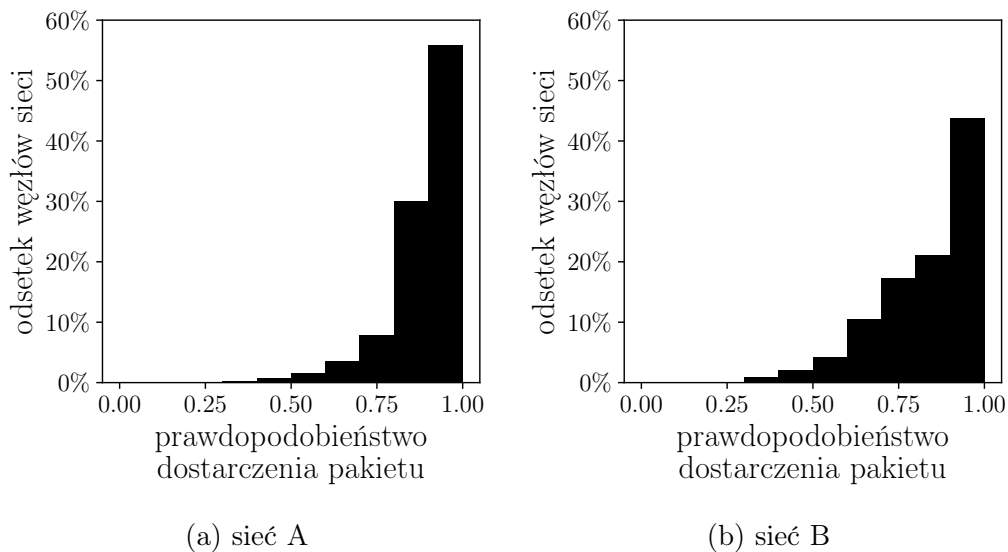
(b) sieć B

Rysunek 3.1: Prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu w zależności od lokalizacji urządzenia końcowego sieci dla rzeczywistych wdrożeń IoT sieci A i B.

Na rysunku 3.1 przedstawiono rozkłady prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu w zależności od lokalizacji urządzenia końcowego sieci dla rzeczywistych wdrożeń IoT sieci A i B. Każdemu punktowi lokalizacji na wykresie 3.1 przyporządkowany jest kolor odpowiadający wartości prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu wyznaczonego zgodnie z 3.1. Taki rodzaj wizualizacji pozwala na zilustrowanie zmienności sukcesu transmisji w zależności od lokalizacji oraz identyfikację obszarów w sieci o pogorszonych warunkach transmisji.

Można zaobserwować zależność pomiędzy odległością urządzenia końcowego sieci od bramy, a mniejszym prawdopodobieństwem dostarczenia pakietu, jednak rysunek pokazuje też pewne wyjątki, tj. węzły sieci, które mimo iż znajdują się w niedalekiej odległości od bramy nadal mają niskie prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu. Mapy dodatkowo wskazują, że występują skupiska punktów z wyraźnie niższym prawdopodobieństwem dostarczenia pakietu, mimo że znajdującą się w niewielkiej odległości od bramy.

Dodatkowo, w celu uwidocznienia dokładnego odsetka urządzeń końcowych sieci z określoną wartością prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu, interpretację graficzną w postaci histogramów przedstawiono na rysunkach 3.2a i 3.2b.

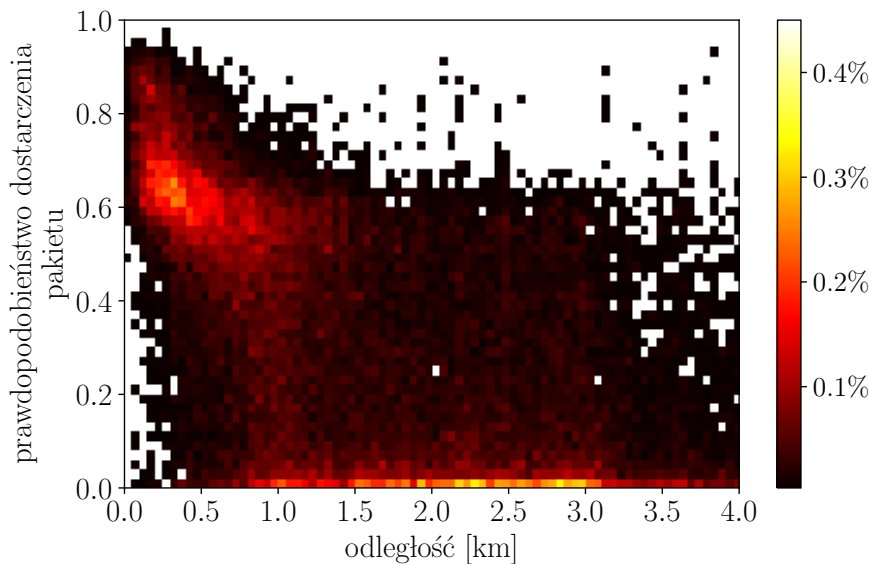


Rysunek 3.2: Rozkłady prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu dla rzeczywistych wdrożeń IoT sieci A i B.

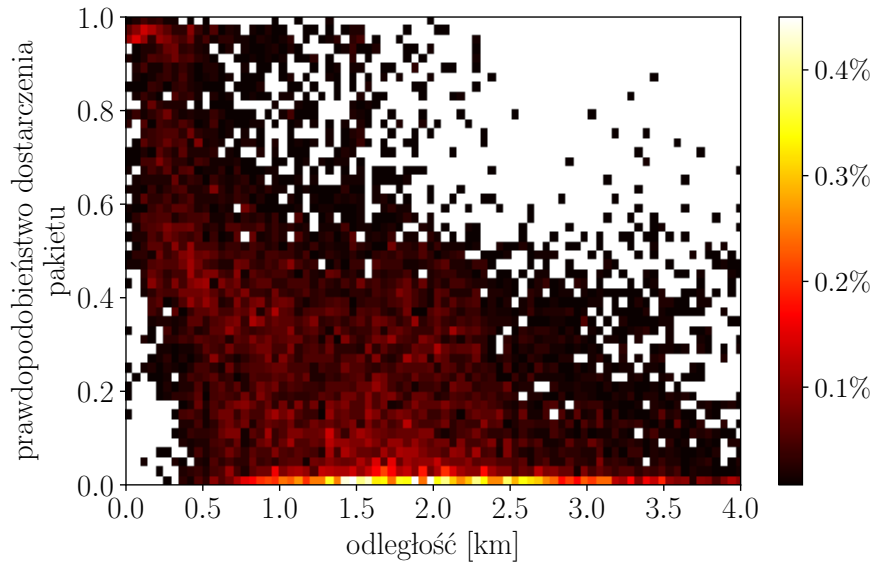
Rozkłady prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu mają podobną charakterystykę dla obydwu rzeczywistych wdrożeń sieci A i B. Znacząca większość urządzeń końcowych sieci posiada relatywnie wysokie prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu (powyżej wartości 0.8). Jednak występuje pewien odsetek urządzeń sieci posiadających prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu poniżej wartości 0.5, a więc charakteryzuje się znaczną utratą danych.

Konkretnie, odsetek węzłów, dla których prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu jest mniejsze niż 50% wynosi 1% dla sieci A i 3% dla sieci B. Transmisja danych, w której co drugi pakiet nie zostaje dostarczony, nie zapewnia możliwości skutecznej i efektywnej komunikacji pomiędzy węzłem końcowym sieci a bramą. Stąd, węzły sieci posiadające prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu mniejsze niż 50% oceniane są jako te niebędące w stanie skutecznie skomunikować się z siecią.

Wyniki bardziej szczegółowej analizy prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu przedstawiono na rysunku 3.3 ilustrującym dwuwymiarowe rozkłady prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu w zależności od odległości pomiędzy urządzeniem końcowym sieci a bramą LoRa dla rzeczywistych wdrożeń IoT sieci A i B. Dla każdego węzła końcowego sieci wyznaczono prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu do każdej z bram LoRa zgodnie z regułą 3.2 oraz odległość euklidesową. Rozkłady te ilustrują częstość wystąpienia wartości prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu z urządzenia końcowego do bramy LoRa znajdujących się w danej odległości od siebie. Intensywność barwy na wykresie odpowiada procentowemu udziałowi badanego zjawiska, gdzie ciemniejsze odcienie symbolizują niższe wartości procentowe, a jaśniejsze odcienie reprezentują wartości wyższe. Rozkłady te umożliwiają identyfikację intensywności występowania zjawiska, gdzie bezpośrednia komunikacja urządzenia znajdującego się w danej odległości do bramy jest utrudniona.



Rysunek 3.3: Rozkład prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu w zależności od odległości pomiędzy urządzeniem końcowym sieci a bramą LoRa dla rzeczywistego wdrożenia IoT sieci A. Szerokość kubełków  $0.05 \text{ km} \times 0.02$ .



Rysunek 3.3: Rozkład prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu w zależności od odległości pomiędzy urządzeniem końcowym sieci a bramą LoRa dla rzeczywistego wdrożenia IoT sieci B. Szerokość kulek  $0.05 \text{ km} \times 0.02$ . Kontynuacja rysunku.

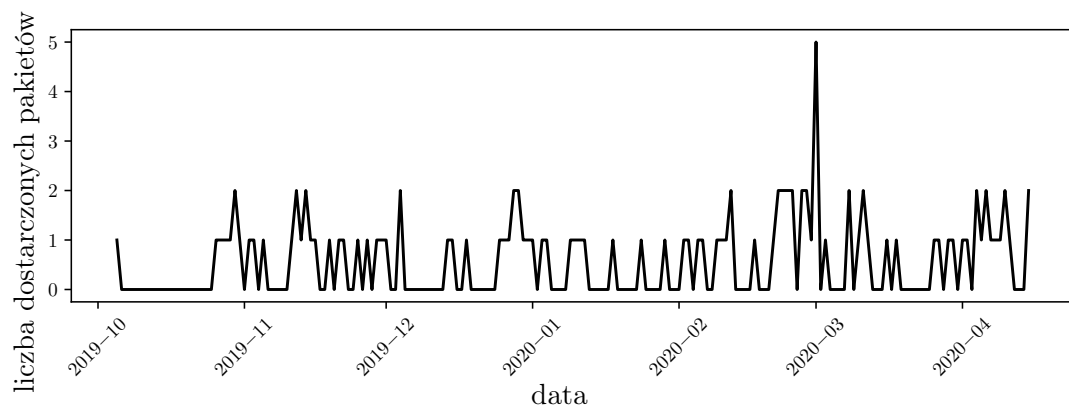
Rezultaty wskazują, że zarówno w sieci A jak i B występuje pewien odsetek węzłów z ograniczoną bezpośrednią łącznością z bramą znajdującą się w relatywnie niewielkiej odległości od nich. Na zaprezentowanych rozkładach (rysunek 3.3) widoczna jest zwiększona reprezentacja liczby urządzeń o niskim prawdopodobieństwie dostarczenia pakietu dla węzłów sieci położonych w odległości około 1–3 km od bramy. Według [4] zasięg technologii LoRa w terenie miejskim wynosi 3–5 km, a podmiejskim 10–15 km. Problem z ograniczoną łącznością dla pewnego odsetka urządzeń sieci dla wdrożeń A i B nie wynika jedynie ze zbyt dużej odległości od bramy powodującej brak objęcia zasięgiem urządzeń położonych w dalekiej lokalizacji. Pomiary wykonane w sieci dużej skali pokazują jednak znacznie niższy zasięg w warunkach miejskich dla dużej sieci urządzeń zainstalowanych w budynkach – dla odległości powyżej 2.5 km jedynie pojedyncze węzły uzyskują prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu powyżej 50%.

### 3.1.1 Identyfikacja węzłów o ograniczonej łączności z siecią

Rozpatrzono przypadki węzłów sieci o niskim prawdopodobieństwie dostarczenia pakietu (mniejszym niż 50%), pod względem oceny potrzeby, warunków oraz potencjału dla zastosowania urządzeń relay w sieci LoRa.

W analizie uwzględniono dane pochodzące z urządzeń, będących w eksploatacji przez relatywnie długi okres czasu i posiadają stosunkowo długą historię pomiarów. W szczególności, uwzględniono urządzenia, których czas operacyjny wynosi co najmniej 90 dób. Dla większości węzłów sieci A i B analizowany okres czasu jest dłuższy i obejmuje występowanie różnych pór roku, co pozwala na uwzględnienie wpływu zmiennych warunków na transmisję sygnału. Ponadto, w celu uzyskania reprezentatywnego obrazu stałej pracy w danym węzle sieci z analizowanego zbioru danych wykluczono pomiary pochodzące z lokalizacji, w których w rozpatrywanym okresie czasu mogła mieć miejsce wymiana urządzenia, obejmująca demontaż starego i montaż nowego sprzętu, co może prowadzić do przerw w zbieraniu danych.

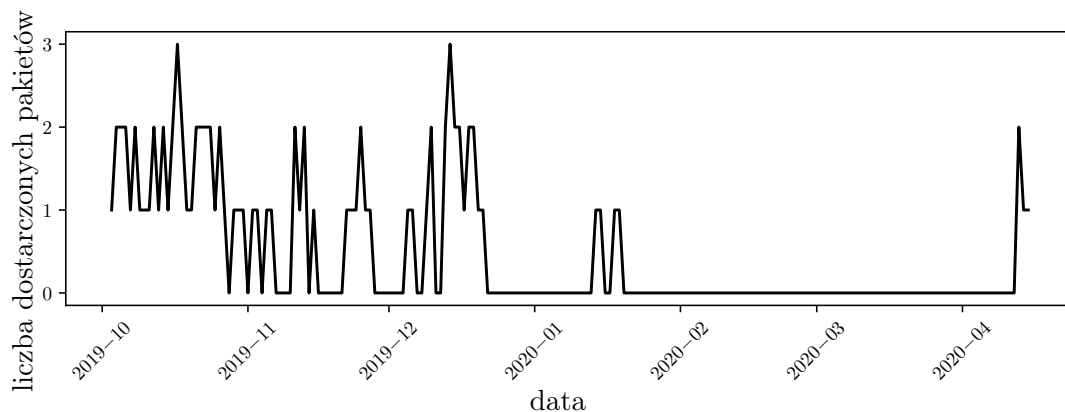
Na rysunkach 3.4, 3.5, 3.6 przedstawiono graficzną interpretację szeregów czasowych liczby sukcesów transmisji (liczby dostarczonych pakietów) na dobę dla pojedynczych urządzeń końcowych sieci spełniających wyżej wymienione kryteria.



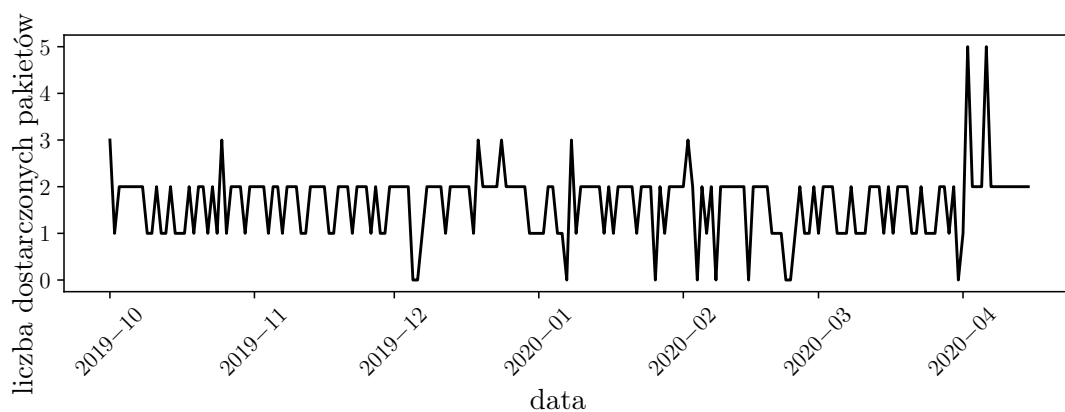
Rysunek 3.4: Liczba dostarczonych pakietów na dobę z pojedynczego urządzenia końcowego sieci. Scenariusz częstych krótkotrwałych przerw w łączności urządzenia z siecią.

Urządzenia sieci skonfigurowane są do transmitowania dwóch pakietów na dobę, jednak sporadycznie ma miejsce dodatkowa transmisja danych dlatego na wykresach występują momenty z liczbą dostarczonych pakietów większą niż 2. W przypadkach zaprezentowanych na rysunkach 3.4, 3.5 zastosowanie urządzenia relay może poprawić skuteczność dostarczenia danych do bramy.

Występujące przerwy w transmisji dla poszczególnych urządzeń końcowych sieci w analizowanym zbiorze pomiarów przyjmują różne formy, w tym rzadkie długotrwałe nieciągłości sygnału (rysunek 3.5), które występują sporadycznie, ale utrzymują się przez dłuższe okresy czasu. Występują również scenariusze ograniczonej łączności urządzeń końcowych z siecią, charakteryzujące się krótkotrwałymi, ale często występującymi przerwami sygnału jak zaprezentowano na rysunku 3.4. W innym scenariuszu mogą pojawiać się



Rysunek 3.5: Liczba dostarczonych pakietów na dobę z pojedynczego urządzenia końcowego sieci. Scenariusz rzadkich długotrwałych przerw w łączności urządzenia z siecią.

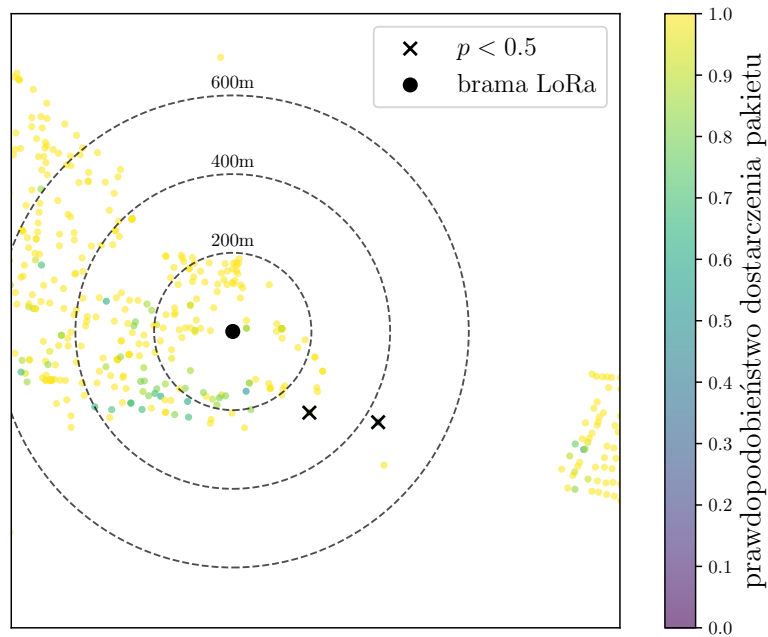


Rysunek 3.6: Liczba dostarczonych pakietów na dobę z pojedynczego urządzenia końcowego sieci. Scenariusz rzadkich krótkotrwałych przerw w łączności urządzenia z siecią.

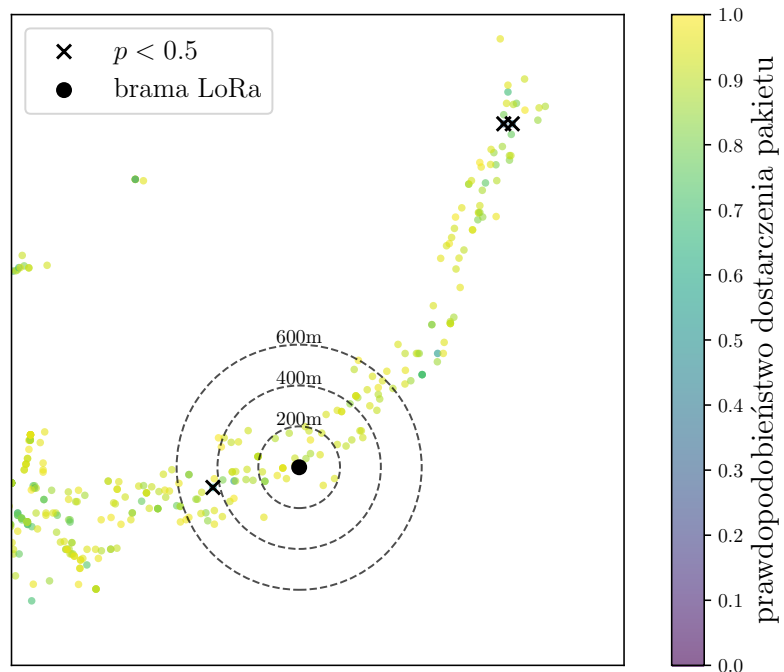
rzadko występujące przerwy w łączności (rysunek 3.6), jednak takie epizodyczne i krótkotrwałe przerwy w dostarczaniu pakietów danych w rozważanych wdrożeniach sieci LoRa nie mają istotnego negatywnego wpływu na komunikację urządzenia z siecią.

Na rysunkach 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 przedstawiono przykładowe fragmenty obszarów topologii sieci A i B z wyszczególnieniem lokalizacji węzłów, które nie są w stanie skutecznie skomunikować się z siecią tj. dla których prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu jest mniejsze niż 50% (ozn. na rysunku  $p < 0.5$ ). Zaznaczone na rysunkach okręgi pomocnicze określają obszar w promieniu o danej odległości od bramy LoRa stanowiącej środek okręgu. Dla czytelności rysunków lokalizacje węzłów sieci z prawdopodobieństwem dostar-

czenia pakietu mniejszym niż 50% dodatkowo zaznaczono czarnym krzyżem.



Rysunek 3.7: Fragment obszaru sieci A.



Rysunek 3.8: Fragment obszaru sieci B.

W przypadku przedstawionym na rysunku 3.7 w odległości pomiędzy 200

a 600 metrów od bramy LoRa znajdują się dwa punkty lokalizacji, w których prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu jest mniejsze niż 50%, a więc węzły te nie potrafią efektywnie komunikować się z siecią.

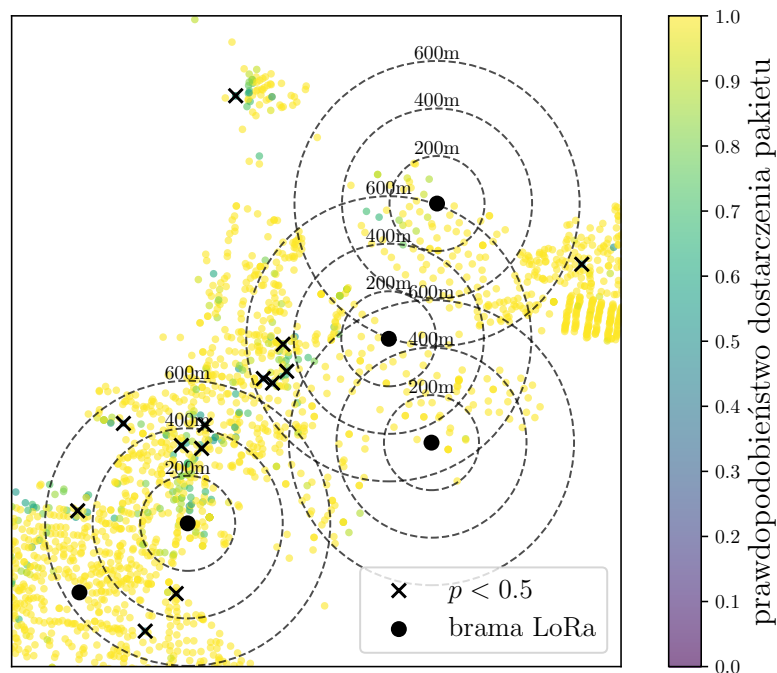
Nie mniej jednak, istniejąca infrastruktura sieci w rozpatrywanym obszarze wydaje się wystarczająca w sensie pokrycia zasięgiem sieci, ponieważ większość węzłów w tym regionie charakteryzuje się wysokimi wartościami prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu. Ponadto, w obrębie pierścienia wyznaczonego przez okręgi o promieniach odległości 400 m i 600 m od bramy LoRa najdalej położony węzeł nie wykazuje problemów z łącznością z siecią, a wręcz charakteryzuje się wysoką skutecznością w dostarczaniu pakietów (prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu większe od 0.9).

Podobny scenariusz przedstawiono na rysunku 3.8 ilustrującym fragment topologii sieci B. Liczba węzłów o ograniczonej łączności z punktem dostępowym w tym obszarze sieci jest niewielka (kilka węzłów) oraz większość urządzeń w wybranym regionie sieci charakteryzuje się wysokim prawdopodobieństwem sukcesu transmisji. W scenariuszach zaprezentowanych na rysunkach 3.7, 3.8 rozbudowa infrastruktury sieci poprzez instalację kolejnej bramy LoRa z powodu niewielkiej liczby węzłów posiadających ograniczoną łączność z punktem dostępowym nie jest uzasadnione. Problem z łącznością niewielkiej liczby węzłów sieci można rozwiązać bardziej efektywnie za pomocą mniej złożonego i tańszego rozwiązania, jakim jest zastosowanie urządzenia relay, którego umieszczenie w odpowiedniej lokalizacji może zwiększyć skuteczność w dostarczaniu danych z węzłów posiadających ograniczoną łączność z siecią i przesyłać je dalej rozszerzając zasięg sieci bez konieczności instalacji nowych bram.

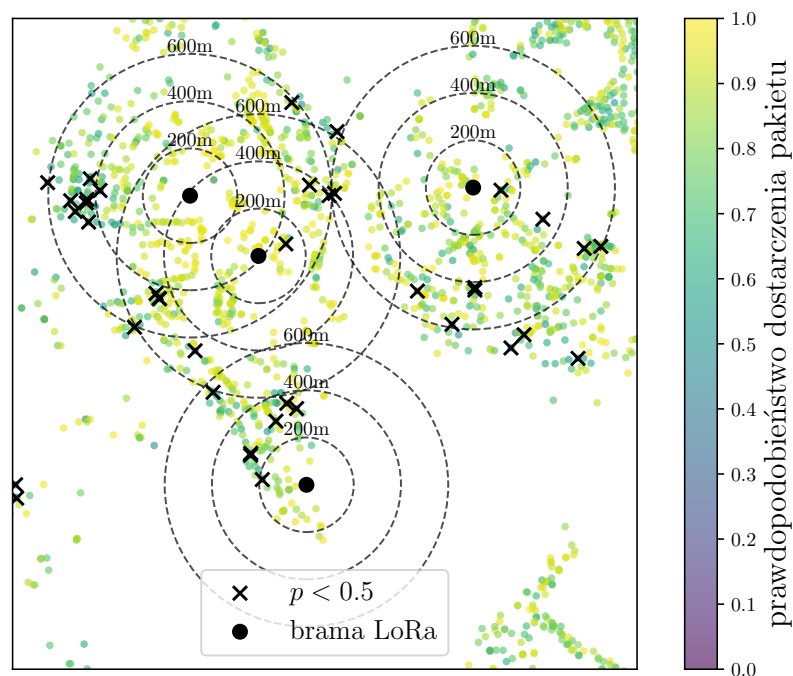
W przypadku zaprezentowanym na rysunku 3.9, w samym jego środku widoczna jest grupa kilku lokalizacji węzłów nie potrafiących efektywnie skomunikować się z siecią mimo, że w promieniu 450–1000 m znajduje się kilka bram LoRa. Podobną sytuację zaprezentowano na rysunku 3.10 ilustrującym fragment obszaru topologii sieci B. Obydwa przypadki przedstawiają zjawisko występowania problemu słabej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym jedynie dla niewielkiej grupy węzłów znajdujących się w obszarach charakteryzujących się gęstym rozmieszczeniem bram LoRa (średnia odległość pomiędzy nimi wynosi około 1 km dla sieci A i B). Ponadto, obecna ilość oraz położenie punktów dostępowych w wybranych obszarach sieci wydają się być wystarczające w sensie zapewnienia pokrycia zasięgiem sieci, ponieważ większość urządzeń w rozpatrywanym regionie wykazuje wysoką skuteczność w dostarczaniu pakietów.

Przedstawione przypadki pokazują, że zastosowanie urządzeń relay w wielu lokalizacjach może być alternatywą dla instalacji większej liczby bram LoRa w celu rozwiązania problemu z ograniczoną łącznością urządzeń w sieci. Dodanie urządzeń relay jest rozwiązaniem mniej kosztownym i mniej skomplikowanym pod względem rozbudowy infrastruktury.



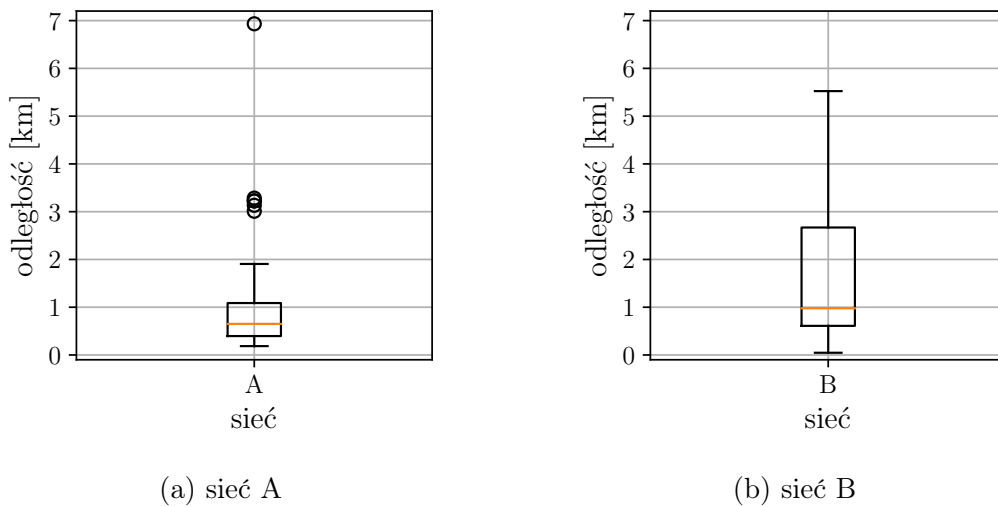


Rysunek 3.9: Fragment obszaru sieci A. Przypadek gęstego rozmieszczenia bram LoRa w wybranym obszarze sieci (średnia odległość między nimi wynosi  $1 \pm 0.4$  km).



Rysunek 3.10: Fragment obszaru sieci B. Przypadek gęstego rozmieszczenia bram LoRa w wybranym obszarze sieci (średnia odległość między nimi wynosi  $1 \pm 0.3$  km).

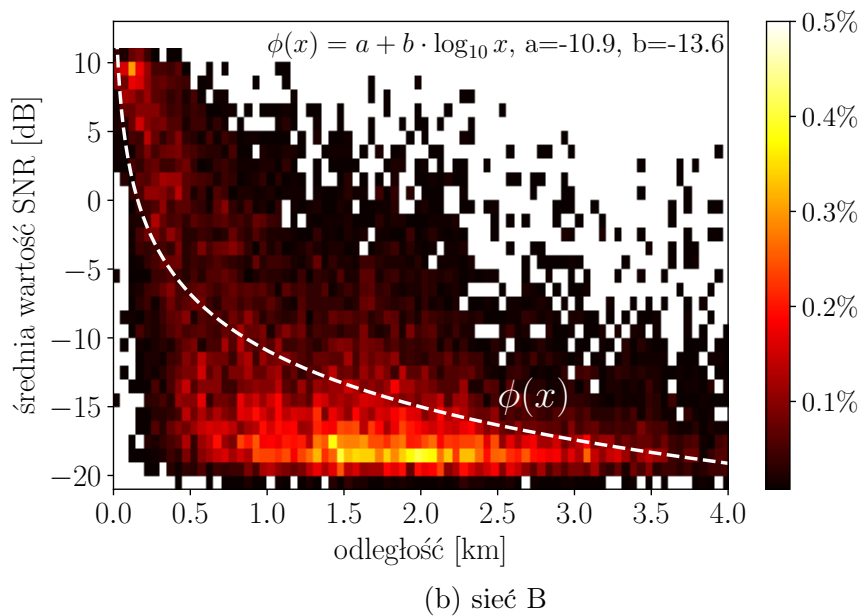
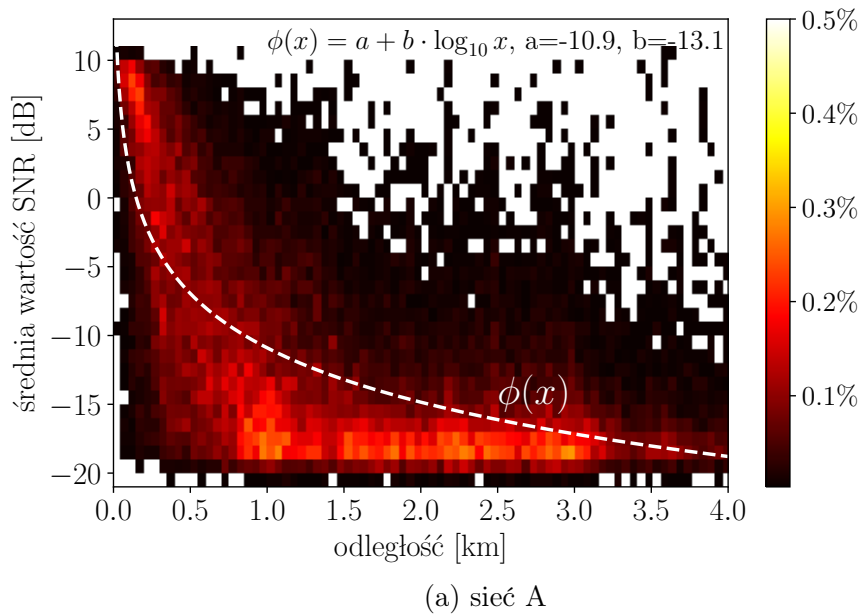
Na rysunku 3.11 przedstawiono wykresy pudełkowe odległości pomiędzy urządzeniem końcowym a bramą dla całej populacji węzłów o ograniczonej bezpośredniej łączności z bramą LoRa (tzn. posiadających prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu mniejsze niż 50%) w topologiach sieci A i B. W przypadku topologii sieci A większość populacji węzłów o ograniczonej łączności z siecią znajduje się w odległości około jednego kilometra od bramy, w przypadku sieci B jest to połowa populacji takich węzłów.



Rysunek 3.11: Wykresy pudełkowe odległości pomiędzy punktem dostępowym a węzłem o ograniczonej bezpośredniej łączności z w siecią.

## 3.2 SNR

Na rysunku 3.12 przedstawiono dwuwymiarowe rozkłady liczby (%) urządzeń sieci w zależności od średniej wartości SNR (2.2) uzyskanej dla pakietów odebranych przez bramę LoRa znajdującą się w danej odległości od urządzenia końcowego sieci. Dodatkowo, na rysunkach zaprezentowano krzywą  $\phi(x)$  dopasowaną do danych i reprezentującą zależność pomiędzy średnią wartością SNR uzyskaną na podstawie pakietów odebranych z lokalizacji znajdującej się w danej odległości od bramy LoRa. Model ten określa spodziewaną jakość sygnału węzła sieci w danym położeniu i został wyznaczony metodą najmniejszych kwadratów [95].

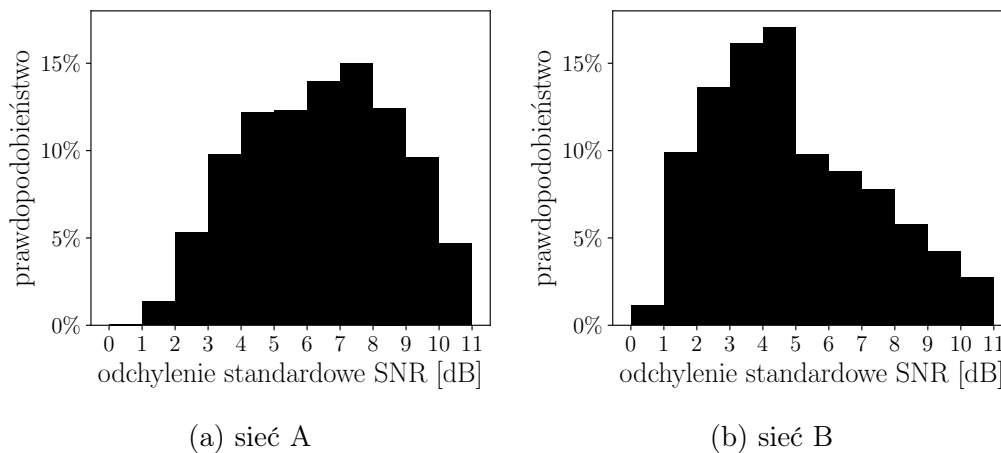


Rysunek 3.12: Rozkład liczby (%) urządzeń końcowych sieci w zależności od średniej wartości wskaźnika SNR i odległości pomiędzy urządzeniem końcowym sieci a bramą LoRa dla rzeczywistych wdrożeń IoT sieci A i B. Szerokość kubełków wynosi  $1 \text{ dB} \times 0.05 \text{ km}$ .

Jeśli transmisja węzła sieci charakteryzuje się wartościami SNR powyżej krzywej  $\phi(x)$ , oznacza to, że jakość sygnału w tym węzle sieci jest lepsza niż przewidywana dla danego dystansu. Potencjał modelu opisującego relację między wskaźnikiem SNR a odległością do punktu dostępowego może być

rozpatrywany w kategoriach strategii wyboru węzłów relay w sieci LoRa. Model ten dostarcza informacji, które mogą być wykorzystane do identyfikacji najbardziej efektywnych lokalizacji dla węzłów relay, zwiększając tym samym ogólną wydajność i niezawodność sieci. Wskaźnik SNR jest związany ze współczynnikiem błędu bitowego (ang. bit error rate, BER) urządzenia końcowego sieci, co z kolei wpływa na współczynnik błędu pakietu (ang. packet error rate, PER) [96]. W [97] pokazano, że takie same wartości współczynnika BER są możliwe do uzyskania dla różnych SNR w zależności od wartości współczynnika SF z jakim transmitowany jest sygnał.

Minimalny poziom SNR wymagany do poprawnej demodulacji sygnału różni się w zależności od współczynnika SF z jakim transmitowany jest sygnał [98]. Dla  $SF=7$  minimalny poziom SNR wynosi  $-7.5$  dB i maleje o  $2.5$  dB wraz ze wzrostem współczynnika SF o jeden. Parametr SF związany jest z warunkami propagacji sygnału. Wyższy SF zwiększa odporność sygnału na szum i zakłócenia. W przypadku topologii sieci A około 15% (w przypadku topologii sieci B – około 10%) urządzeń wykazuje zmienność wskaźnika SNR na poziomie odchylenia standardowego równego co najmniej 9 dB co w teorii przekłada się na zmianę współczynnika SF o cztery jednostki.



Rysunek 3.13: Rozkłady wartości odchylenia standardowego wskaźnika SNR [dB] urządzeń końcowych sieci dla rzeczywistych wdrożeń IoT sieci A i B.

W przypadku sieci LoRa zmienność poziomu SNR jest znacznie większa, niż obserwuje się to w innych technologiach oraz występuje wysoka nieprzewidywalność warunków transmisji względem tych wyznaczonych w sposób teoretyczny. Prowadzi to do konieczności zwiększenia redundancji (poprzez instalację większej liczby bram, aby uzyskać zasięg dla odchylnych w dół urządzeń), albo do zastosowania węzłów pośredniczących dla tych urządzeń.

### 3.3 Podsumowanie

Wyniki analizy prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu wskazują na występowanie w sieci kilku procent węzłów niebędących w stanie skutecznie skomunikować się z siecią ze względu na straty pakietów wielkości 50%, mimo, że większość z nich umiejscowiona jest w relatywnie niedalekiej odległości od bramy LoRa. W przypadku rzeczywistego wdrożenia sieci A znacząca większość (75%) węzłów o ograniczonej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym znajduje się w odległości mniejszej niż około 1 km od bramy, w przypadku sieci B – 75% takich węzłów znajduje się w odległości mniejszej niż około 2.5 km od bramy LoRa. Odległości te są stosunkowo niewielkie, z uwagi na daleki zasięg komunikacji technologii LoRa, który w środowiskach miejskich wynosi od 3 do 5 km, natomiast w rejonach podmiejskich może osiągać od 10 do 15 km [4].

Problem z ograniczoną łącznością urządzeń końcowych z siecią nie występuje wyłącznie w węzłach zlokalizowanych na obrzeżach sieci oraz nie wynika jedynie ze zbyt dużej odległości od punktu dostępowego powodującej brak objęcia zasięgiem peryferiów sieci. Pewien odsetek węzłów niemogących skutecznie skomunikować się z siecią występuje w obszarach charakteryzujących się gęstym rozmieszczeniem bram LoRa w regionie (średnia odległość między bramami wynosi około  $1 \pm 0.4$  km w przypadku topologii sieci A, w obszarze z rysunku 3.9 i około  $1 \pm 0.3$  km w przypadku sieci B w obszarze zilustrowanym na rysunku 3.10). Większość węzłów sieci rozlokowanych w tych obszarach wykazuje wysoką skuteczność transmisji, co zmniejsza prawdopodobieństwo, że istotną przyczyną nieefektywnej komunikacji części urządzeń z siecią w tym przypadku stanowi zjawisko interferencji, zakłócenia zewnętrznych źródeł sygnału radiowego lub lokalne przeszkody zwiększające tłumienność kanału transmisyjnego do najbliższego punktu dostępowego, tak np. duże budynki.

Rezultaty przeprowadzonej analizy zbioru danych pochodzących z wielkoskalowych komercyjnych wdrożeń IoT działających w technologii LoRa wykazują zgodność z założeniami dostawcy tej technologii – Semtech [14] – o zjawisku występowania w sieci LoRa/LoRaWAN kilku procent urządzeń o słabej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym [15]. Dodatkowo, wyniki te sugerują, że zastosowanie węzłów relay w sieci ma sens, i wykazuje potencjał jako rozwiązanie pozwalające na ograniczenie występowania obszarów, w których urządzenia nie mogą efektywnie skomunikować się z siecią. Jednak nie znamy odpowiedzi na pytanie, w jakich lokalizacjach w sieci powinny się takie urządzenia znajdować. Stąd, w kolejnych etapach pracy badawczej skupiono się na opracowaniu metod wyboru lokalizacji węzłów relay w sieci LoRa.

Przedstawione w niniejszym rozdziale spostrzeżenia oraz wyniki analiz stanowią rozszerzenie prac opublikowanych w artykule [39]. Ponadto, potencjał rozpatrywanego zbioru danych został także wykorzystany w rozważaniach, których wyniki opublikowano w pracach [40, 41, 42, 43], których jestem współautorką. Zbiór danych stanowiący przedmiot prowadzonych przeze

mnie analiz i pozyskany w ramach projektu SCIoT (7), jest według mojej najlepszej wiedzy, niespotykany jak dotąd w literaturze. Większość dostępnych prac analizujących efektywność sieci LoRa opisuje realizację badań w oparciu o zestawy pomiarów zebranych z wykorzystaniem platform testowych (obejmujących kilka fizycznych urządzeń) [4, 99, 100, 101, 102, 103], aniżeli wielkoskalowe komercyjne wdrożenia obejmujące tysiące urządzeń rozlokowanych w zróżnicowanym terenie i działających w rzeczywistych warunkach. Chociaż w literaturze jest dostępny zestaw danych [104] obejmujący kilka milionów pomiarów zebranych na terenie miejskim, ale z wykorzystaniem kilku bram odbierających sygnały z zewnętrznych źródeł. Zatem dane nie zawierają informacji o źródle sygnału (np. współrzędnych lokalizacji), co utrudnia przeprowadzenie analiz np. z wykorzystaniem typowych metryk efektywności sieci [33] tj. prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu czy zależności tego wskaźnika (oraz miar SNR, RSSI) od odległości.

## Rozdział 4

# Środowisko ewaluacji efektywności metod wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących

W celu ewaluacji zaproponowanych metod wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa wykorzystano platformę testową obejmującą model symulacyjny oraz narzędzie symulatora zdarzeń dyskretnych. Dzięki zastosowaniu tego środowiska możliwe jest przeprowadzanie symulacji działania sieci w konfiguracjach będących rezultatem zaproponowanych metod. W kontekście badania algorytmów przeznaczonych do zastosowania w sieciach jest to jedna z podstawowych metod walidacji, poza podejściem analitycznym. Dzięki modelowaniu symulacyjnemu, możliwe jest przetestowanie różnych scenariuszy i konfiguracji bez fizycznego wdrażania systemu sieciowego, co jest zarówno kosztowne, jak i czasochłonne. Symulacje umożliwiają przeprowadzenie szerokiej gamy testów w kontrolowanym środowisku cyfrowym, co przyczynia się do lepszego zrozumienia potencjalnych wyzwań, planowaniu odpowiedzi na wystąpienie awarii oraz identyfikacji optymalnych rozwiązań przed rzeczywistą implementacją.

### 4.1 Model symulacyjny

W celu weryfikacji zaproponowanych metod wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa opisanych w rozdziałach 5 i 6 przeprowadzono eksperymenty symulacyjne z wykorzystaniem symulatora zdarzeń dyskretnych. Zastosowanie symulacji umożliwia odtworzenie zachowania sieci działającej w konfiguracji określonej przez wynikowy zestaw lokalizacji węzłów relay wskazanych przez zaproponowane metody optymalizacyjne. Symulator działania sieci stanowi efektywne narzędzie dla testowania i rozwoju metod zaprojektowanych dla zastosowań w sieci przed wdrożeniem rozwiązań w praktyce. Do przeprowadzenia symulacji wykorzystano narzędzie Objective Modular Network Testbed (OMNeT++) w języku C++ [105, 106]. OMNeT++ jest

środowiskiem modułowym, opartym na komponentach i bibliotekach do symulacji. W pracy doktorskiej badania oparto o model symulacyjny w środowisku OMNeT++ opracowany w ramach projektu SCIoT (7). Model ten jest rozszerzoną wersją schematu przedstawionego we wcześniejszych pracach [107] omawiających prawdopodobieństwo kolizji na podstawie modeli propagacji sygnału radiowego dostępnych w środowisku OMNeT++. Wiele mechanizmów warstwy MAC dla LoRaWAN może być modelowanych przy użyciu dostępnych środowisk programistycznych [108]. Na potrzeby prowadzonych w ramach niniejszej rozprawy badań model symulacyjny uwzględnia rozszerzenie realizujące komunikację z wykorzystaniem węzłów pośredniczących.

W ramach pracy, w modelu symulacyjnym uwzględnione zostały kluczowe parametry konfiguracyjne urządzeń, funkcjonalność zużycia baterii dla wszystkich węzłów zasilanych baterią oraz moduł symulacji urządzenia działającego w trybie relay.

### 4.1.1 Architektura modelu symulacyjnego

#### Reprezentacja urządzeń sieci

Model symulacyjny uwzględnia cztery rodzaje modułów (podstawowych jednostek modelu symulacyjnego) reprezentujących poszczególne komponenty systemu. Reprezentacja urządzeń sieci w rozważanym modelu symulacyjnym realizowana jest za pomocą następujących modułów:

1. End Point (EP) – moduł symulujący urządzenie końcowe LoRa czyli sensor;
2. Access Point (AP) – moduł symulujący bramę LoRa (punkt dostępowy), działający jako router;
3. Weak Point (WP) – moduł symulujący urządzenie końcowe LoRa (sensor) ze słabą bezpośrednią łącznością do AP;
4. Relay Point (RP) – moduł symulujący urządzenie relay, czyli sensor sąsiadujący z WP.

#### Komunikacja pomiędzy urządzeniami

Komunikacja pomiędzy modułami w środowisku OMNeT++ reprezentującymi urządzenia sieci realizowana jest przez tzw. połączenia bramkowe: „in” (wejścia) oraz „out” (wyjścia). Połączenia te umożliwiają przesyłanie wiadomości (pakietów danych) między różnymi modułami, co pozwala na symulowanie interakcji i komunikacji w ramach sieci.

Każdy punkt dostępowy AP posiada połączenia bramkowe z wszystkimi urządzeniami końcowymi EP i RP znajdującymi się w jego zasięgu. Także każde urządzenie końcowe RP posiada właściwe połączenia ze wszystkimi urządzeniami WP znajdującymi się w jego zasięgu. Dla uproszczenia, nie



ma połączeń między urządzeniami końcowymi EP i WP znajdującymi się w swoim zasięgu; interakcje (zakłócenia) między nimi są symulowane za pomocą funkcji kolizji pakietów w modułach AP i RP.

Operacja transmisji pakietu w sieci LoRa jest symulowana przez wysłanie dwóch, powiązanych ze sobą wiadomości:

- wiadomości „jobStart” ze znacznikiem czasu dla momentu odebrania ramki oraz wiadomości;
- wiadomości „jobEnd” ze znacznikiem czasu dla zakończenia transmisji ramki.

Podczas symulacji, gdy moduł (np. End Point, Access Point, Weak Point lub Relay Point) wysyła pakiet LoRa, najpierw wysyłana jest wiadomość „jobStart” z odpowiednim znacznikiem czasowym, który rejestruje moment, w którym pakiet zostaje odebrany przez odpowiedni moduł docelowy. Następnie, po przesłaniu ramki, wysyłana jest druga wiadomość „jobEnd” z odpowiednim znacznikiem czasowym, który rejestruje zakończenie transmisji ramki. Dzięki temu mechanizmowi, mechanizm symulacji może monitorować czas trwania transmisji, rejestrować momenty odbioru i zakończenia przesyłania danych, co umożliwia analizę i ocenę wydajności oraz zachowania sieci LoRa w różnych scenariuszach.

### Kolizje pakietów

Kolizje pakietów oraz odbiór pakietów są symulowane za pomocą pięciu możliwych stanów, dokładnie opisanych w [107]. Logika implementacji programu symulacyjnego jest określona przez te stany i realizowana poprzez odpowiednie zmiany stanów zgodnie z ich relacjami przedstawionymi na rysunku 4.1. Kolizje oraz odbiór pakietów są symulowane przez pięć możliwych stanów systemu zaimplementowanego w punkcie dostępowym AP:

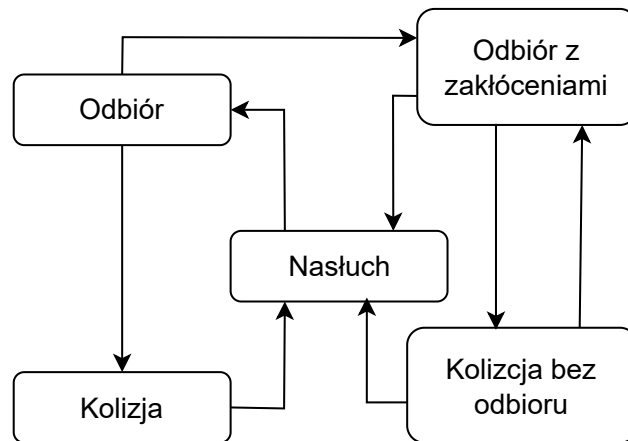
- Nasłuch – Punkt dostępowy AP oczekuje w trybie gotowości na przybycie wiadomości „jobStart” na wszystkich ośmiu możliwych kanałach transmisyjnych (symulując częstotliwości radiowe używane przez LoRa);
- Odbiór – AP oczekuje w trybie nasłuchu na przybycie wiadomości „jobEnd” sygnalizującej zakończenie transmisji na zajętych kanałach;
- Kolizja – AP otrzymał kolejną wiadomość „jobStart” od innego EP na zajętych kanałach. Różnica w mocy transmisyjnej obu symulowanych pakietów jest mniejsza niż 8 dBm lub nowo otrzymany „jobStart” ma większą moc transmisyjną, a oba pakiety mają tę samą wartość współczynnika SF;
- Odbiór z zakłóceniami – AP otrzymał kolejną wiadomość „jobStart” od innego EP na zajętych kanałach. Różnica w mocy transmisyjnej między

dwoma symulowanymi pakietami jest większa niż 8 dBm, a nowo otrzymana wiadomość „jobStart” ma niższą moc transmisyjną, przy czym oba pakiety mają tę samą wartość współczynnika SF,

- Kolizja bez odbioru – AP oczekuje na przybycie wiadomości „jobEnd” na zajętych kanałach, lub na przybycie „jobStart” z wartością mocy transmisji większą o 8 dB od wartości mocy transmisji zakłóceń.

Podsumowując, jeśli różnica w mocy transmisji między dwoma kolidującymi symulowanymi pakietami jest większa bądź równa niż 8 dB, a drugi odebrany pakiet ma niższą moc transmisji, oraz oba pakiety mają ten sam współczynnik rozpraszania SF, wtedy pierwszy pakiet zostanie odebrany. W każdym innym przypadku kolizji pakietów, żaden z pakietów nie zostanie odebrany.

Wykorzystane w procesie ewaluacji metod środowisko symulacyjne uwzględnia model symulacyjny, który dokładniej oddaje specyfikę LoRa i LoRaWAN, ponieważ uwzględnia mechanizmy: kolizji oraz dostępu do łącza ALOHA, w przeciwieństwie do podejścia zaproponowanego np. w pracy [26] realizującego schemat komunikacji wieloskokowej w LoRaWAN z zastosowaniem TDMA bez uwzględnienia mechanizmu kolizji. Z kolei w pracy [27] model symulacyjny ogranicza się wyłącznie do zastosowania urządzeń LoRa działających w trybie ciągłego nasłuchu, a więc najbardziej kosztownych energetycznie (klasa C). Eliminuje to konieczność szczegółowego harmonogramowania i zarządzania czasem otwarcia okien transmisji. Jednak w praktyce, w sieciach LoRaWAN większość urządzeń należy do klasy A lub B charakteryzujących się mniejszym zużyciem energii.



Rysunek 4.1: Diagram przejścia stanów punktu dostępowego AP w rozważanym modelu symulacyjnym. Podobny schemat realizowany jest dla modułu RP.

### 4.1.2 Parametry modelu

W modelowaniu transmisji pakietów w sieci LoRa uwzględniono kluczowe parametry konfiguracyjne, niezbędne dla przybliżenia warunków symulacji do zachowania sieci w rzeczywistych warunkach. Transmisję w sieci LoRa charakteryzuje kilka kluczowych parametrów:

- Szerokość pasma (ang. bandwidth) – jak opisano w podrozdziale 2.1 – określa zakres częstotliwości fal radiowych wykorzystywanych do transmisji danych. Istnieje 8 możliwych kanałów transmisji (symulujących częstotliwości radiowe używane przez LoRa) oraz jeden dodatkowy kanał dedykowany do transmisji między węzłami o ograniczonej łączności z siecią (WP) a węzłami relay (RP).
- Współczynnik rozpraszania SF – parametr opisany w 2.1. Wartości współczynnika rozpraszania rozważane w modelu symulacyjnym należą do zbioru {7, 8, 9, 10, 11, 12}.
- Moc nadawania (ang. transmission power) – moc z jaką urządzenie transmituje sygnał. Standard LoRaWAN oraz regulacje dotyczące wykorzystywanych częstotliwości pozwalają na moc nadawania do 14 dBm.

Dostępny w OMNeT++ model tłumienia sygnału radiowego (ang. signal fading) jest oparty na modelu propagacji sygnału SUI (ang. Stanford University Interim) – rozszerzenia wcześniejszej pracy wykonanej przez AT&T Wireless i dalszej analizie przedstawionej w [94].

### Walidacja modelu

Walidacja modelu została przeprowadzona poprzez analizę uproszczonego scenariusza, zawierającego 3 punkty dostępowe, 2 węzły relay, 4 węzły końcowe – spośród których 3 węzły posiadające słabą bezpośrednią łączność z docelowym punktem dostępowym. Wszystkie węzły końcowe operowały w takiej samej wartości współczynnika rozpraszania SF (2.1). Walidacja odbyła się w dwóch etapach:

1. Walidacja kolizji pakietów – wyniki modelu zostały porównane z wynikami równań skuteczności dla protokołu dostępu do łącza ALOHA [109] oraz wynikami prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu zaprezentowanymi w [107]. Następnie, rozmiar sieci został zwiększony oraz dodano jednoczesną transmisję z różnymi współczynnikami rozpraszania SF.
2. Walidacja zużycia energii urządzeń sieci – zakładając transmisję jednego pakietu na dobę przez każde z urządzeń końcowych (EP), urządzeń relay (RP) i punktów o słabym zasięgu (WP), przeprowadzono symulacje na okresy miesięczne i roczne. Wyniki zużycia energii przez węzły w każdym

okresie zostały porównane z obliczeniami analitycznymi pochodzącymi z tabeli 2.1.

### 4.1.3 Modelowanie zużycia energii urządzenia

Opracowany model symulacyjny został zaprojektowany z uwzględnieniem funkcjonalności wyznaczania poziomu zużycia baterii dla poszczególnych modułów reprezentujących różne rodzaje urządzeń działających w ramach sieci. Funkcjonalność wyznaczania poziomu zużycia baterii umożliwia gromadzenie i monitorowanie danych o zużyciu energii w trakcie czasu operacyjnego sieci w środowisku symulacyjnym. Funkcjonalność ta jest komponentem modelu umożliwiającym przeprowadzenie eksperymentów z różnorodnymi strategiami zarządzania energią oraz dokładne testowanie i porównywanie różnych metod optymalizacji zużycia energii. Takie podejście pozwala nie tylko na zrozumienie, jak poszczególne strategie wpływają na długość czasu operacyjnego baterii urządzeń w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych, ale także umożliwia identyfikację potencjalnych obszarów do poprawy efektywności energetycznej urządzeń w sieci.

Funkcjonalność wyznaczenia poziomu zużycia energii przez poszczególne moduły wykorzystuje model energetyczny opisany w rozdziale 2.2 z uwzględnieniem wartości zaprezentowanych w tabeli 2.1 oraz bierze pod uwagę różne funkcje modułów, które zostały wyróżnione:

- EP i WP – moduły wysyłające jeden pakiet na dobę. Po odbyciu transmisji oczekują na potwierdzenie odbioru pakietu lub wiadomość zwrotną (w dół łącza) wysłaną odpowiednio przez AP lub RP;
- RP – moduł wysyłający własny pakiet raz na dobę oraz ponownie przesyła otrzymane od wszystkich, przyporządkowanych mu WP, pakiety do AP;
- AP – moduł reprezentujący punkty dostępowe podłączone do zasilania elektrycznego, dlatego zużycie energii przez AP nie jest mierzone.

## 4.2 Metryka efektywności metod wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących

Metryka efektywności algorytmu wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa jest wyznaczona na podstawie poziomu zużycia energii zmierzonego w całej sieci podczas symulowanego okresu jej działania. Poziom zużycia energii w sieci LoRa jest jedną z typowych metryk efektywności działania sieci, jak wskazano w pracy [33]. Poziom zużycia energii w całej sieci w symulowanym okresie działania sieci jest sumą poziomów zużycia energii dla wszystkich czasów transmisji mających miejsce w tym okresie.

Metryka efektywności algorytmu wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa określona jest według następującej formuły:

$$\sum_{i \in \mathcal{X}} (E_{TX_i} + E_{RX_i}) \quad (4.1)$$

gdzie  $\mathcal{X}$  jest zbiorem wszystkich czasów transmisji mających miejsce w symulowanym okresie działania sieci dla urządzeń końcowych tj. urządzeń działających w trybie relay, urządzeń posiadających słabą bezpośrednią łączność z punktem dostępowym LoRa oraz pozostałych urządzeń końcowych sieci.  $E_{TX_i}$  to poziom zużycia energii przeznaczony na transmisję dla  $i$ -tego czasu transmisji,  $E_{RX_i}$  to poziom zużycia energii przeznaczony na nasłuch dla  $i$ -tego czasu transmisji. Niniejsza metryka efektywności algorytmu wyrażona jest w jednostce miliamperosekund [mAs].

W kontekście metryki 4.1 mówimy, że wybrana metoda wyboru lokalizacji węzłów relay jest bardziej efektywna od innej, jeżeli poziom zużycia energii w całej sieci uwzględniającej zestaw węzłów pośredniczących wskazany przez tą metodę jest mniejszy od poziomu zużycia energii w sieci uwzględniającej zestaw węzłów pośredniczących wskazany przez drugą metodę.

## 4.3 Eksperymenty symulacyjne

W procesie oceny efektywności zaproponowanych w ramach niniejszej rozprawy metod wykorzystano środowisko ewaluacji metod wyboru lokalizacji węzłów relay w sieci LoRa obejmujące model symulacyjny z zastosowaniem symulatora zdarzeń dyskretnych OMNeT++ [106]. W ramach ewaluacji zaproponowanych metod (opisanych w rozdziałach 5 oraz 6) przeprowadzono eksperymenty symulacyjne z uwzględnieniem różnych scenariuszy topologii sieci. W eksperymentach symulacyjnych uwzględniono topologie z losowym rozmieszczeniem urządzeń w sieci oraz te odzwierciedlające rozmieszczenie węzłów w rzeczywistych wdrożeniach IoT. W przypadku topologii sieci o losowym rozmieszczeniu węzłów, do ich generowania posłużono się powstałym w ramach prac w projekcie SCIoT 7 generatorem losowych topologii sieci LoRa. Z kolei w przypadku topologii sieci opartych o dane dotyczące rozmieszczenia węzłów w rzeczywistych wdrożeniach IoT, to zostały one pozyskane w ramach realizacji prac w projekcie SCIoT 7.

W dalszej części rozdziału przedstawiono szczegółowy opis elementów istotnych w kontekście eksperymentów symulacyjnych przeprowadzonych w procesie ewaluacji zaproponowanych metod wyboru lokalizacji węzłów relay w sieci LoRa. Dodatkowe eksperymenty przeprowadzone dla poszczególnych metod oraz wyniki zostały opisane w rozdziałach poświęconych tym metodom (rozdziały 5, 6).

### 4.3.1 Generowanie topologii sieci

Szczególne uwagę poświęcono dwóm głównym rodzajom topologii sieci: losowym oraz tym, opartych o dane z rzeczywistych wdrożeń IoT. Topologie sieci oparte od dane dotyczące rozmieszczenia węzłów w rzeczywistym wdrożeniu sieci przybliżają realistyczne środowisko testowe oraz zapewniają możliwość badania systemów w warunkach jak najbardziej zbliżonych do tych, które napotykają w praktycznych aplikacjach. Dzięki temu, wyniki eksperymentów można ekstrapolować na rzeczywiste scenariusze użytkowania. Z kolei zastosowanie losowych topologii sieci pozwala na analizę opracowanych metod dla różnych wielkości badanych sieci oraz dla różnych gęstości rozmieszczenia węzłów w tych sieciach. Rozpatrzono topologie sieci złożone z co najmniej tysiąca węzłów i kilku punktów dostępowych LoRa.

Do generowania topologii sieci LoRa stanowiącej punkt wyjścia dla eksperymentów z wykorzystaniem środowiska symulacyjnego dla sprawdzenia efektywności zaproponowanych algorytmów wyboru lokalizacji węzłów relay, posłużono się narzędziem PyLOREs powstałym w ramach prac w projekcie SCIoT (7). Jest to uniwersalne oprogramowanie, umożliwiające wprowadzenie schematu sieci oraz generowanie losowych topologii sieci w postaci zbioru punktów (węzłów sieci) rozmieszczonych w obrębie wielokąta o wymiarach określonych przez użytkownika. Narzędzie uwzględnia także możliwość konfiguracji parametrów takich jak np. moc nadawania, czułości urządzenia, modelu propagacji sygnału radiowego czy liczbę wykorzystywanych kanałów radiowych.

*Węzły końcowe sieci.* Urządzenia końcowe sieci (węzły końcowe sieci) reprezentowane są przez wierzchołki grafu reprezentującego sieć (jak opisano w podrozdziale 2.4). Graf połączeń wygenerowany zostaje na podstawie współrzędnych punktów lokalizacji oraz teoretycznego modelu propagacji sygnału (np. SUI, Okumura–Hata) mających wpływ na występowanie krawędzi między wierzchołkami. Zasięg komunikacji pomiędzy urządzeniami reprezentowanymi przez węzły grafu odzwierciedlany jest przez występowanie krawędzi łączącej odpowiednie wierzchołki grafu.

*Punkty dostępowe LoRa.* Integralnym komponentem topologii sieci LoRa są węzły pełniące rolę punktów dostępowych/bram. Zestaw lokalizacji punktów dostępowych sieci zostaje wyznaczony za pomocą metody optymalizacyjnej opisanej w [20], również opracowanej w ramach projektu SCIoT 7. Niniejsza metoda wyboru lokalizacji punktów dostępowych w sieci LoRa identyfikuje punkty lokalizacji sieci/węzły sieci, w których należy umieścić bramy LoRa. Bazując na wynikowym zestawie lokalizacji bram wskazanym przez tę metodę niniejsze punkty interpretowane są właśnie jako bramy LoRa w danej topologii sieci.

*Węzły o ograniczonej bezpośredniej łączności z siecią.* W ramach danej topologii sieci, współrzędne węzłów o ograniczonej łączności z punktem dostępowym/bramą LoRa (a więc z siecią), którym należy przyporządkować węzły relay, wyznaczone są w sposób losowy oraz w ilości zadanej arbitral-

nie, stanowiącej wartość pewnego odsetka węzłów danej topologii sieci. W niniejszych rozważaniach rozpatrzono różne wartości odsetka węzłów sieci o ograniczonej łączności z punktem dostępowym. Prawdopodobieństwo wyboru danego węzła sieci jako tego, któremu należy przyporządkować węzeł relay jest jednakowe dla wszystkich punktów lokalizacji w topologii sieci, ze względu losowanie zgodnie z rozkładem jednostajnym [110].

### 4.3.2 Scenariusze eksperymentów

#### Losowe topologie sieci

Losową topologię sieci charakteryzuje równomierne rozmieszczenie węzłów sieci w zadanym obszarze. Współrzędne  $x$  i  $y$  każdego punktu losowane są zgodnie z rozkładem jednostajnym [110] w zakresie określonym przez wymiary prostokąta ograniczającego obszar topologii sieci. Każdy punkt wewnątrz prostokąta ma równą szansę bycia wylosowanym, co oznacza, że nie ma preferencji dla żadnej lokalizacji wewnątrz określonego obszaru.

Rozważono następujące losowe topologie sieci:

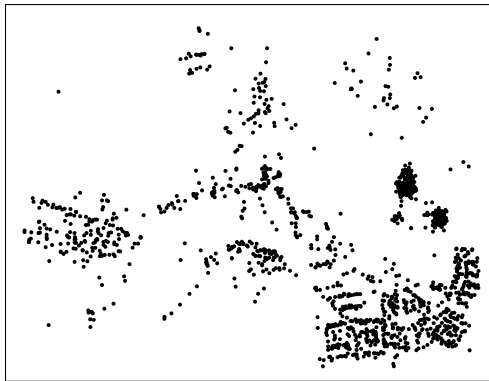
1. Topologia R(1000) – składa się z 1000 węzłów rozmieszczonych na obszarze prostokąta o wymiarach  $1000m \times 1500m$ .
2. Topologia R(1500) – składa się z 1500 węzłów rozmieszczonych na obszarze prostokąta o wymiarach  $2500m \times 3750m$ .

Uwzględnienie topologii sieci wygenerowanych w oparciu o losowe rozmieszczenie węzłów zapewnia różnorodność przypadków testowych oraz analizę szerokiego zakresu możliwych scenariuszy. Istotnym aspektem w procesie ewaluacji zaproponowanych metod jest jednak uwzględnienie topologii sieci o rozmieszczeniu węzłów odzwierciedlającym warunki rzeczywistych wdrożeń. W topologiach sieci rzeczywistego wdrożenia węzły sieci mogą być skoncentrowane w pewnych obszarach ze względu na specyficzne potrzeby aplikacji lub ograniczenia fizyczne. Takie topologie zostały uwzględnione w procesie ewaluacji zaproponowanych metod wyboru lokalizacji węzłów relay w sieci LoRa. Należy zaznaczyć, że tematyka generowania topologii sieci stanowi odrębny i złożony obszar badawczy. W niniejszej pracy nie skupiam się na szczegółowych aspektach tego zagadnienia.

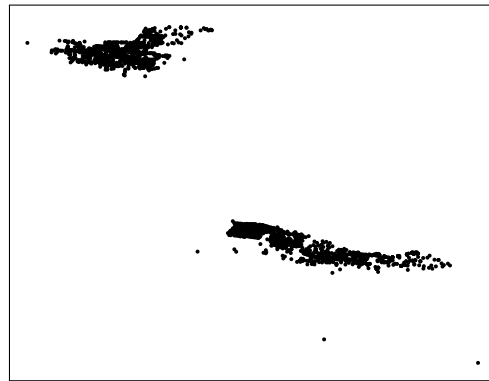
#### Topologie sieci oparte na danych z rzeczywistych wdrożeń

Oprogramowanie PyLOREs oferuje również funkcjonalność wczytywania współrzędnych geograficznych punktów sieci bezpośrednio z pliku w oparciu o dane dotyczące rozmieszczenia urządzeń sieci w rzeczywistych wdrożeniach IoT. W procesie ewaluacji metod wyboru lokalizacji węzłów relay w sieci LoRa rozważono dwie topologie sieci pochodzące z rzeczywistych wdrożeń IoT działających w technologii LoRa, których dane dotyczące rozmieszczenia węzłów w sieci pozyskano w ramach realizacji projektu SCIoT 7.

1. Topologia sieci rzeczywistego wdrożenia P (rysunek 4.2b) składa się z 1760 węzłów podzielonych na dwa oddzielne obszary po 944 węzłów rozmieszczonych na obszarze  $1257m \times 3059m$  i 816 węzłów rozmieszczonych na obszarze  $1197m \times 2236m$ . Niniejsza topologia sieci stanowi fragment rzeczywistego wdrożenia IoT sieci A opisanej w rozdziale 3 (tabela 3.1).
2. Topologia sieci rzeczywistego wdrożenia T (rysunek 4.2a) składa się z 1719 węzłów rozproszonych na obszarze o wymiarach  $2491m \times 4085m$ .



(a) rozmieszczenie węzłów w sieci T



(b) rozmieszczenie węzłów w sieci P

Rysunek 4.2: Mapy ilustrujące rozmieszczenie węzłów sieci w topologiach sieci rzeczywistego wdrożenia IoT: T i P.

### Scenariusze testowe

Efektywność opracowanych metod wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa została zweryfikowana z wykorzystaniem różnych scenariuszy topologii sieci uwzględniających zróżnicowane wartości odsetka urządzeń sieci o ograniczonej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym, które wymagają przyporządkowania węzłów pośredniczących. Wielkość odsetka węzłów o ograniczonej łączności z siecią rzędu kilku procent została dobrana w odniesieniu do [15], w którym dostawca technologii LoRa (Semtech [14]) ocenia występowanie problemu ograniczonej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym jako zjawisko charakterystyczne dla kilku procent urządzeń końcowych sieci.

Rozważono osiem następujących scenariuszy:

1. R(1000, 3%), R(1000, 5%) – losowe topologie sieci z losowym przyporządkowaniem węzłów o ograniczonej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym; odsetek: 3% i 5%, odpowiednio;
2. R(1500, 3%), R(1500, 5%) – losowe topologie sieci z losowym przyporządkowaniem węzłów o ograniczonej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym; odsetek: 3% i 5%, odpowiednio;



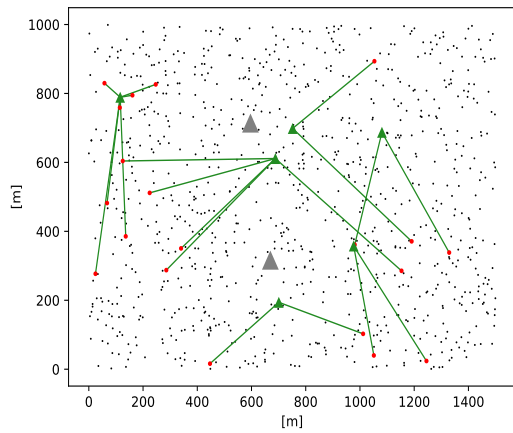
3. P(2.5%), P(5%), P(7%) – topologia P rzeczywistego wdrożenia IoT z losowym przyporządkowaniem węzłów o ograniczonej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym; odsetek: 2.5%, 5% i 7%, odpowiednio;
4. T(2.5%), T(5%), T(7%) topologia T rzeczywistego wdrożenia IoT z losowym przyporządkowaniem węzłów o ograniczonej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym; odsetek: 2.5%, 5% i 7%, odpowiednio.

Ze względu występowanie w rozważanych scenariuszach elementu losowości (np. losowe wskazania lokalizacji węzłów wymagających przyporządkowania węzłów relay) w procesie ewaluacji metod wyboru lokalizacji węzłów relay dla każdego scenariusza wygenerowano populację przypadków o odpowiedniej liczności, aby uwzględnić zróżnicowanie możliwych wariantów. W przypadku topologii sieci o losowym rozmieszczeniu węzłów rozmiar populacji dla pojedynczego scenariusza wynosi 1000. W przypadku topologii sieci rzeczywistych wdrożeń o określonym rozmieszczeniu węzłów w sieci, ale o losowym wskazaniu węzłów wymagających przyporządkowania węzłów relay, rozmiar populacji dla pojedynczego scenariusza wynosi 100.

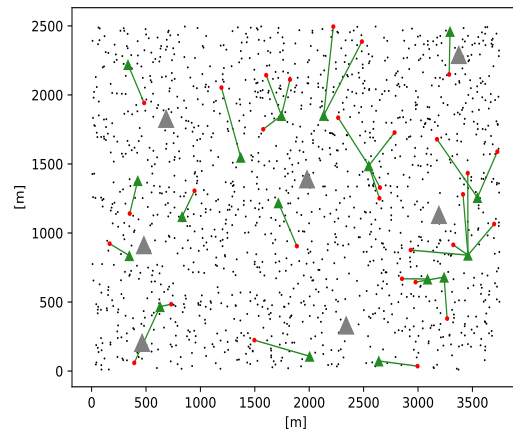
W początkowej fazie badań, podczas opracowywania pierwszej metody wyboru lokalizacji węzłów relay (opisanej w rozdziale 5), w procesie ewaluacji wykorzystano losowe topologie sieci. Natomiast w przypadku opracowania bardziej zaawansowanego rozwiązania (opisanego w rozdziale 6), zestaw badań został poszerzony i przeprowadzono testy zarówno z wykorzystaniem topologii losowych, jak i opartych o dane lokalizacji z rzeczywistych wdrożeń. Informacje dotyczące procesu ewaluacji metod opisano w rozdziałach poświęconych poszczególnym metodom.

Na rysunku pogładowym 4.3 przedstawiono graficzną interpretację rozmieszczenia węzłów w sieci dla przykładowych topologii sieci. Zaprezentowane na rysunku 4.3 mapy uwzględniają topologie sieci o losowym rozmieszczeniu węzłów (R(1000) i R(1500)) oraz topologie sieci rzeczywistego wdrożenia P i T. Jednocześnie, na mapach z rysunku 4.3 uwzględniono przykładowe wskazania lokalizacji węzłów o ograniczonej łączności z siecią wraz z wynikowym przyporządkowaniem węzłów relay wskazanym przez zaproponowaną przeze mnie metodę wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących opisaną w rozdziale 6.

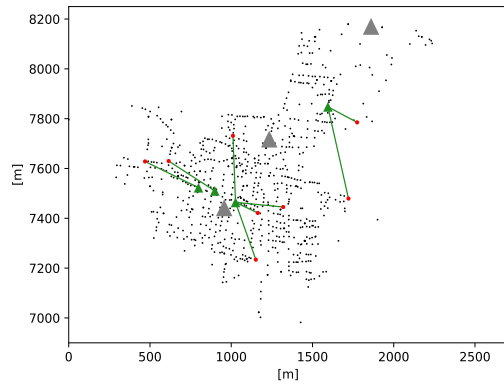
a)



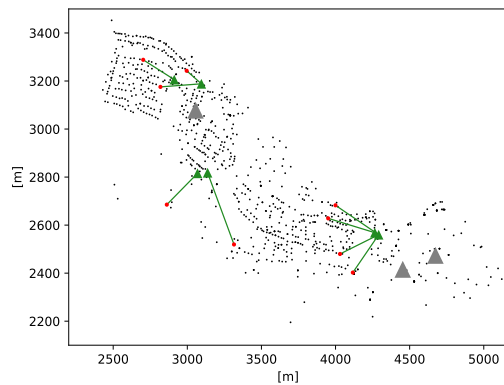
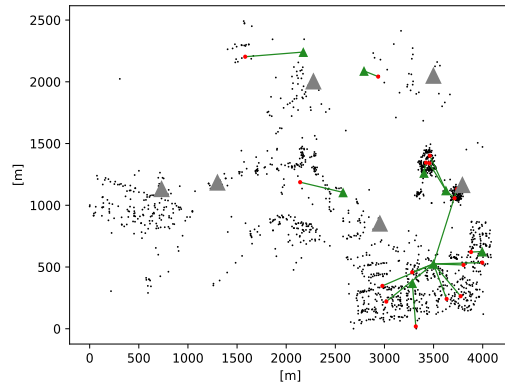
b)



c)



d)



- węzeł końcowy
- ▲ punkt dostępowy LoRa
- węzeł o ograniczonej łączności z siecią
- ▲ węzeł relay

Rysunek 4.3: Rysunki poglądowe ilustrujące wynik zaproponowanego algorytmu wyboru lokalizacji węzłów relay w przykładowych scenariuszach topologii sieci (szczegółowy opis algorytmu przedstawiono w rozdziale 6). Na rysunku uwzględniono mapy przykładowych topologii sieci o losowym rozmieszczeniu węzłów R(1000) – (a) i R(1500) – (b) oraz dwóch topologii sieci rzeczywistego wdrożenia P – (c) (złożona z dwóch oddzielnych regionów) i T – (d).

## Rozdział 5

# Metoda wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących z indywidualnym przyporządkowaniem

### 5.1 Sformułowanie problemu

W ramach zagadnienia dotyczącego występowania w sieciach LPWAN obszarów, w których zasięg jest ograniczony, tzn. miejsc, gdzie urządzenia nie są w stanie skutecznie komunikować się z siecią, skupiłam się na problematyce wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących/relay w sieci LoRa. Podstawowym problemem do rozwiązania jest, że dla danego zbioru węzłów o ograniczonej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym (a więc o ograniczonej łączności z siecią, wymagających przyporządkowania węzłów relay) –  $W$  (jak zdefiniowano w podrozdziale 2.4.1), należy wskazać lokalizacje węzłów do działania w trybie relay w sieci, aby wybór ten był zoptymalizowany pod względem zapewnienia efektywności energetycznej sieci, przy zapewnieniu pełnego pokrycia węzłów o ograniczonej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym. W efekcie, sieć działająca w konfiguracji określonej przez wynik metody wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących ma charakteryzować się efektywnym energetycznie wykorzystaniem zasobów i jak najmniejszym zużyciem energii.

W procesie opracowania rozwiązania problemu wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa wyzwaniem stanowią: wybór odpowiednich charakterystyk i parametrów mających znaczenie w kontekście analizy poziomu zużycia energii w urządzeniach oraz sformułowanie adekwatnych kryteriów oddających cel optymalizacji i istotne aspekty problemu. Ważnym elementem jest zachowanie ograniczeń związanych ze zużyciem energii urządzeń, które są zasilane baterią. Poziom energii wymagany do przekazywania pakietów przez urządzenie sieci wskazane do działania w trybie relay może zmniejszyć jego pierwotny przewidywany czas działania w porównaniu do sytuacji, gdyby urządzenie to nie pracowało w tym trybie. Zazwyczaj urządzenia sieci wdrażane są z pojemnością baterii wystarczającą do utrzymania łączności

przez cały zakładany czas działania sieci, nawet w pesymistycznych warunkach transmisji radiowej tzn. przy najwyższym zużyciu energii. Ważne jest opracowanie strategii zarządzania siecią, która nie zmniejszy oczekiwanego czasu życia urządzeń, a więc wyznaczy do trybu relay jedynie urządzenia, które dysponują pewnym zapasem energii. Do rozwiązania problemu wyboru lokalizacji węzłów do działania w trybie relay właściwe jest więc wdrożenie rozwiązania realizującego strategię zarządzania energią w sieci mającą na celu maksymalizację żywotności baterii urządzenia, a tym samym maksymalizację czasu życia sieci.

Problem wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w grafie reprezentującym sieć możliwych połączeń można określić stosując notację zdefiniowaną w podrozdziale 2.4. Dla grafu reprezentującego sieć  $G = (V, E)$  (2.12) oraz danego zbioru  $W$  (zawierającego węzły sieci wymagające przyporządkowania węzłów pośredniczących) należy wskazać zbiór węzłów relay  $R$ , przy zapewnieniu pełnego pokrycia dla węzłów wymagających przyporządkowania węzłów pośredniczących oraz efektywność energetyczną sieci działającej w konfiguracji wskazanej przez wynikowe przyporządkowanie.

## 5.2 Analiza budżetu energii urządzenia

Istotnym aspektem w opracowaniu metody wyboru lokalizacji węzłów relay w sieci, w celu zapewnienia efektywności energetycznej, jest uwzględnienie parametrów, charakterystyk oraz kryteriów związanych z zużyciem energii przez urządzenia sieci. Zgodnie z [111], zużycie energii związane z przesyłaniem pakietu LoRa można podzielić na odrębne fazy obejmujące wyjście urządzenia końcowego z trybu uśpienia, przygotowanie radia, transmisję sygnału, dezaktywację radia i przetwarzanie końcowe. Wszystkie te fazy, z wyjątkiem transmisji sygnału, wykazują minimalne lub brak zależności od alokacji zasobów dlatego są one uznawane za jednolite we wszystkich urządzeniach końcowych w rozpatrywanym modelu. Stąd, w niniejszych rozważaniach skupiono się przede wszystkim na istotnych w sensie zużycia energii fazach związanych z przesyłaniem pakietu czyli na transmisji oraz nasłuchu.

Kluczowym parametrem związanym z transmisją sygnału w sieci LoRa, mającym znaczący wpływ na poziom zużycia energii w urządzeniu jest współczynnik SF (jak opisano w podrozdziale 2.1). Transmisja sygnału ma miejsce zarówno w przypadku urządzenia działającego w trybie relay jak i urządzenia o ograniczonej łączności z siecią. Zakładamy, że węzeł o ograniczonej łączności z punktem dostępowym transmituje pewną ilość pakietów w ciągu doby, tak samo jak inne urządzenia końcowe sieci, jednak sygnał ten nie jest w stanie dotrzeć bezpośrednio do punktu dostępowego. Do roli węzłów pośredniczących chcemy wyznaczyć urządzenia sieci, które dzięki swojemu umiejscowieniu są w stanie odebrać sygnał od węzła o ograniczonej łączności z punktem dostępowym (a więc także z siecią), a następnie retransmitować otrzymany pakiet w sposób zapewniający wysokie prawdopodobieństwo odbioru tych danych

przez bramę. Stąd, dążymy do wskazania węzłów, które dysponują możliwie najlepszymi parametrami łącza (np. wysokim SNR lub RSSI) zarówno do bramy, jak i do węzła o ograniczonej łączności. Zużycie energii podczas obydwu tych transmisji zależy głównie od współczynnika rozpraszania SF. Węzeł relay będzie musiał przesłać do bramy zarówno pakiety związane z własnymi pomiarami, jak i dodatkowe pakiety odebrane od węzła lub węzłów o ograniczonej łączności. Dlatego w ocenie potencjału danego węzła sieci do działania w trybie relay należy przede wszystkim uwzględnić wartość współczynnika SF, ponieważ przekłada się ona na poziom zużycia energii podczas transmisji pakietów odebranych od węzła o ograniczonej łączności z siecią jak i jego (relay'a) własnych.

Urządzenie działające w trybie relay zużywa energię nie tylko na transmisję, ale również na nasłuch sygnału transmitowanego przez węzeł o ograniczonej łączności z siecią, przy czym poziom tego zużycia energii jest ściśle powiązany z wartością SF urządzenia nadawczego. Zatem w ocenie węzła sieci do pełnienia roli węzła pośredniczącego i przypisaniu go do danego węzła o ograniczonej łączności z siecią właściwe jest by uwzględnić wartości współczynnika SF w jakim operują urządzenia odpowiadające tym węzłom. Niemniej jednak, skoncentrowanie się wyłącznie na parametrze SF determinującym poziom zużycia energii urządzenia na transmisję oraz nasłuch sygnału nie dostarcza kompleksowego obrazu sytuacji operacyjnej urządzenia końcowego sieci.

Wybór węzła sieci do działania w trybie relay oparty tylko na minimalizacji wartości współczynnika SF w komunikacji pomiędzy urządzeniami, a tym samym minimalizacji zużycia energii, może nie być optymalny, jeśli dane urządzenie będzie mogło pełnić rolę węzła pośredniczącego przez zbyt krótki okres czasu. W takim przypadku, dla węzła o ograniczonej łączności z siecią konieczne byłoby częste przełączanie na inne urządzenia relay, co generuje dodatkowy koszt związany ze zużyciem energii na przesłanie pakietów związanych z rekonfiguracją sieci, a także komplikuje zarządzanie operacyjne siecią. W związku z powyższym, konieczne jest uwzględnienie długoterminowej zdolności urządzeń do funkcjonowania w trybie relay.

W ramach niniejszej pracy wybór węzłów pośredniczących opierałam o analizę budżetu energetycznego urządzeń, a więc o oszacowanie dostępnej energii w baterii urządzenia. Analiza budżetu energii urządzenia sprowadza się do wyznaczenia jego poziomu nadwyżki energii z uwzględnieniem ograniczeń związanych ze zużyciem energii w urządzeniu końcowym sieci. Zazwyczaj w standardach producenta zakłada się zapewnienie baterii o pojemności pozwalającej na utrzymanie łączności przez okres np. 10 lat w najbardziej pesymistycznym scenariuszu tj. dla konfiguracji do działania ze współczynnikiem SF=12. Urządzenia skonfigurowane do działania z niższym współczynnikiem SF kumulują niewykorzystaną pulę energii stanowiącą nadwyżkę, która mogłaby zostać wykorzystana do pełnienia funkcji związanych z działaniem urządzenia w trybie relay.

**Nadwyżka energii** Nadwyżka energii urządzenia końcowego sieci wyznaczana jest na podstawie analizy bieżącego poziomu baterii (mAs), pozostałego czasu działania urządzenia (wyznaczonego w liczbie dni) oraz kosztu energetycznego związanego z transmisją pakietu czy przełączeniem urządzenia w tryb relay. Ilość energii (w mAs) jaka przypada na każdy dzień w pozostałym czasie działania  $t_v$  urządzenia  $v$  określona jest następującym równaniem:

$$E_v = \frac{b_v - r_c}{t_v} \quad (5.1)$$

W powyższym równaniu od bieżącego poziomu baterii  $b_v$  węzła  $v$  odejmowany jest koszt energetyczny związany z przełączeniem tego węzła w tryb relay, który poniesie ten koszt, jeśli zostanie wyznaczony do działania w tym trybie. Całość podzielona zostaje przez liczbę dni  $t_v$  pozostałego czasu działania węzła  $v$ , co daje dzienny poziom energii przypadający w pozostałym okresie działania  $t_v$  i stanowi podstawę do wyznaczenia nadwyżki energii węzła  $v$ .

Nadwyżka energii wyznaczana jest na podstawie dziennego budżetu energii urządzenia, zdefiniowanego w równaniu 5.1, po odjęciu energii zużywanej na transmisję pojedynczego pakietu w pesymistycznym scenariuszu zużycia energii. Dzienna nadwyżka energii wyrażona jest przez następujące równanie:

$$E_v^+ = E_v - E_{TX_v}^{max}, \quad (5.2)$$

gdzie  $E_v$  zostało zdefiniowane 5.1,  $E_{TX_v}^{max}$  to poziom energii wymaganej na transmisję pojedynczego pakietu w pesymistycznym scenariuszu zużycia energii tzn. przy SF=12.

**Przykład 1 (Analiza budżetu energii urządzenia)** Załóżmy, że w danym momencie węzeł  $v$  posiada poziom baterii  $b_v = 30000$  [mAs], a jego pozostały czas działania wynosi  $t_v = 50$  dni.

Aby wyznaczyć poziom nadwyżki energii węzła  $v$ , w pierwszym kroku należy wyznaczyć ilość energii jaka przypada na każdy dzień w pozostałym czasie działania węzła  $v$  na podstawie formuły 5.1

$$E_v = \frac{30000 - 14400}{50} = 312 \text{ [mAs]}$$

Następnie, na podstawie formuły 5.2 wyznaczamy wartość nadwyżki energii jaka przypada na każdy dzień w pozostałym czasie działania urządzenia. Pesymistyczne zużycie energii na transmisję pojedynczego pakietu z tabeli 2.1 dla SF=12 wynosi 103.452 [mAs].

$$E_v^+ = 312 - 103.452 = 208.548 \text{ [mAs]}$$

Wartość dziennej nadwyżki energii przypadającej na pozostały czas działania ( $t_v = 50$  dni) urządzenia  $v$  wynosi  $E_v^+ = 208.548$  [mAs].

## 5.3 Graf potencjalnych węzłów pośredniczących

Mając do dyspozycji formuły pozwalające na wyznaczenie poziomu nadwyżki energii urządzenia (przedstawione w poprzednim podrozdziale) pozwalające na ocenę potencjału węzła do działania w trybie relay, kolejnym krokiem algorytmu wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci jest wyznaczenie potencjalnych węzłów do działania w trybie relay spośród węzłów końcowych sieci. Węzeł określany jako potencjalny do działania w trybie relay to węzeł końcowy sieci, który nie jest węzłem o ograniczonej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym, nie pełni funkcji węzła relay, posiada zapas energii oraz w jego zasięgu znajduje się co najmniej jeden węzeł wymagający przyporządkowania węzła pośredniczącego. Definicja zbioru potencjalnych węzłów relay  $P_R$  jest następująca:

$$P_R = \{v \in V \setminus V^* : E_v^+ > 0 \wedge N_G(v) \cap W \neq \emptyset\}, \quad (5.3)$$

gdzie  $V$  – zbiór wierzchołków grafu  $G = (V, E)$  (2.12) reprezentującego sieć;  $V^* = V \setminus (W \cup U \cup R)$ , gdzie  $W$  – zbiór węzłów o ograniczonej łączności z siecią wymagających przyporządkowania węzłów relay;  $U$  – zbiór węzłów o ograniczonej łączności z siecią, które nie wymagają przyporządkowania węzłów relay, ponieważ zostały im one przypisane wcześniej,  $R$  – węzły relay (jak zdefiniowano w podrozdziale 2.4.1).

W następnej kolejności należy wyznaczyć graf potencjalnych węzłów relay, przechowujący informacje o sąsiedztwie węzłów ze zbiorów  $P_R$  i  $W$  oraz o ocenie relacji (połączenia) pomiędzy węzłami w postaci wagi krawędzi. Graf potencjalnych węzłów relay zdefiniowany jest w następujący sposób:

$$G_H = (V_H, E_H, \eta), \quad (5.4)$$

gdzie  $V_H = W \cup P_R$ ,  $E_H$  – zbiór krawędzi, który zawiera wyłącznie krawędzie pomiędzy węzłami ze zbioru  $W$  a węzłami ze zbioru  $P_R$ . Zbiór krawędzi  $E_H$  zdefiniowany jest następująco:

$$E_H = \{(w, v) : w \in W \wedge v \in P_R \wedge v \in N_G(w)\}. \quad (5.5)$$

Z kolei funkcja wagi  $\eta$  określająca potencjał węzła  $v \in P_R$  do działania a trybie relay w celu zapewnienia utrzymania łączności z siecią dla węzła  $w \in W$  zdefiniowana jest następnym podrozdziale (podrozdział 5.3.1, wzór 5.6), ponieważ jej specyfika oraz złożoność wymagają szczegółowego omówienia. Wyodrębnienie jej opisu w osobnej części pozwala na dokładniejsze przedstawienie wszystkich istotnych aspektów oraz umożliwia lepsze zrozumienie jej działania i zastosowania w kontekście omawianego zagadnienia.

### 5.3.1 Funkcja wagi

Problem przyporządkowania węzłów pośredniczących jest rozwiązywany na podstawie wagi krawędzi łączącej wierzchołki odpowiadające węzłom spośród

których jedno wymaga przyporządkowania węzła pośredniczącego ze względu na ograniczoną bezpośrednią łączność z punktem dostępowym (a więc z siecią), a drugie jest potencjalnym węzłem do działania w trybie relay (tzn. jako węzeł pośredniczący). Waga krawędzi przechowuje informację o atrakcyjności wyboru potencjalnego węzła pośredniczącego dla węzła o ograniczonej łączności z siecią.

Każdej krawędzi  $(w, v) \in E_H$  przypisana zostaje waga reprezentująca jakość połączenia między urządzeniami odpowiadającymi węzłom  $w \in W$  i  $v \in P_R$ . Waga krawędzi określona jest przez następującą funkcję  $\eta : E_H \rightarrow \mathbb{R}$ :

$$\eta(w, v) = \frac{E_v^+}{E_{RX_{wv}} + E_{TX_v}} \quad (5.6)$$

gdzie  $E_v^+$  to dzienna nadwyżka energii potencjalnego węzła relay  $v \in P_R$ , wyznaczona na podstawie równania 5.2. Parametr  $E_{RX_{wv}}$  reprezentuje poziom energii (wyrażony w mAs), niezbędnej do nasłuchu przez węzeł  $v$  podczas odbioru pakietu od węzła z ograniczoną łącznością  $w \in W$ . Z kolei  $E_{TX_v}$  to poziom energii (wyrażony w mAs), wymaganej do transmisji pojedynczego pakietu węzła  $w \in W$  przez węzeł  $v \in P_R$ .

Funkcja wagi krawędzi, sformułowana w równaniu 5.6, określa potencjał przyporządkowania potencjalnego węzła relay  $v \in P_R$  do obsługi węzła z ograniczoną łącznością z siecią  $w \in W$ . Formuła  $\eta$  (5.6) składa się z dwóch głównych komponentów. W liczniku uwzględniono ocenę węzła  $v \in P_R$ , jako kandydata do działania w trybie relay, w postaci dziennej nadwyżki energii  $E_v^+$ . W mianowniku uwzględniono jakość połączenia pomiędzy węzłem o ograniczonej łączności z siecią  $w \in W$ , a potencjalnym węzłem relay  $v \in P_R$ , w postaci teoretycznego kosztu energetycznego bezpośrednio związanego z obsługą węzła  $w \in W$  przez potencjalny węzeł relay  $v \in P_R$ . Koszt energetyczny związany z obsługą węzła  $w \in W$  przez potencjalny węzeł relay  $v \in P_R$  uwzględnia dwa istotne pod względem zużycia energii tryby działania węzła działającego w trybie relay. Koszt ten obejmuje: poziom zużycia energii związany z nasłuchem pakietu danych od węzła  $w \in W$  przez węzeł  $v$  ( $E_{RX_{wv}}$ ), wyrażony w [mAs], oraz poziom zużycia energii niezbędny do retransmisji pakietu od węzła  $w \in W$  przez węzeł  $v \in P_R$  ( $E_{TX_v}$ ), wyrażony w [mAs].

W przeciwieństwie do wskaźnika nadwyżki energii  $E_v^+$ , przy wyznaczaniu kosztu energetycznego związanego z obsługą węzła  $w \in W$  przez węzeł  $v$  ( $E_{RX_{wv}} + E_{TX_v}$ ) nie zakłada się pesymistycznego zużycia energii związanego z nasłuchem oraz retransmisją pakietu na poziomie najwyższego współczynnika rozpraszania (SF=12). Dzięki temu waga odzwierciedla oczekiwane zużycie energii podczas transmisji pomiędzy węzłami połączonymi daną krawędzią. Gdyby przyjąć takie założenie, węzły o ograniczonej łączności z siecią sąsiadujące z potencjalnym węzłem relay byłyby nierozróżnialne, co uniemożliwia jednoznaczne określenie przypisania zoptymalizowanego pod względem oszczędzania energii w sieci.

Jakość połączenia pomiędzy węzłem o ograniczonej łączności z siecią, a



potencjalnym węzłem relay jest wyznaczana na podstawie współczynników rozpraszania SF w komunikacji pomiędzy węzłem o ograniczonej łączności z pośrednictwem potencjalnego węzła relay. Należy uwzględnić wartość współczynnika  $SF_{wv}$  w komunikacji pomiędzy węzłem o ograniczonej łączności z siecią a kandydatem na węzeł relay oraz wartość współczynnika  $SF_{vg_v}$  w komunikacji pomiędzy potencjalnym węzłem relay a punktem dostępowym LoRa. Wartość współczynnika  $SF_{wv}$  uwzględniona jest pośrednio w poziomie zużycia energii wymaganym na odbiór pakietu od węzła  $w \in W$  przez węzeł  $v$  ( $E_{RX_{wv}}$ ). Z kolei wartość współczynnika  $SF_{vg_v}$  uwzględniona jest pośrednio w poziomie zużycia energii związanym z transmisją pakietu od węzła  $w \in W$  przez węzeł  $v$  ( $E_{TX_v}$ ).

W ogólnej ocenie potencjału węzła do działania w trybie relay  $v \in P_R$  istotnym parametrem jest jego pozostały czas działania  $t_v$ . Parametr ten uwzględniany jest w wyliczeniach nadwyżki energii węzła. Wpływa to na preferowanie wyboru węzłów zdolnych do działania w trybie relay możliwie najdłużej, co pozwala na minimalizację liczby zmian konfiguracji w przyszłości.

**Przykład 2 (Wyznaczanie wartości funkcji wagi  $\eta$ )** Załóżmy, że całkowity czas działania urządzenia końcowego, zapewniony przez producenta, wynosi 3600 dni (w przybliżeniu 10 lat) oraz, że początkowy poziom naładowania baterii urządzenia równy jest 160 [mAh] (576000 [mAs]).

Niech dane będą urządzenia sieci  $v_1$  oraz  $v_2$ , dla których w bieżącym momencie poziom naładowania baterii wynosi  $b_{v_1} = 567268$  [mAs] i  $b_{v_2} = 565085$  [mAs], a pozostały czas działania urządzeń wynosi 1600 i 1100 dni, odpowiednio,  $t_{v_1} = 1600$  i  $t_{v_2} = 1100$ . (Podane teoretyczne przewidywania wartości poziomów naładowania baterii dla podanych czasów  $t_{v_1}$  i  $t_{v_2}$  są bliskie rzeczywistym wartościom, jeśli przez cały dotychczasowy okres działania urządzenia te były skonfigurowane do działania przy najniższym współczynniku rozpraszania  $SF_{v_1g_{v_1}} = SF_{v_2g_{v_2}} = 7$ . Wartości te zostały oszacowane na podstawie modelu zużycia energii 2.2).

W pierwszej kolejności, dla każdego z urządzeń  $v_1$  i  $v_2$ , wyznaczamy ilość dostępnej energii na dzień według formuły 5.1, potrzebną do obliczenia dziennej nadwyżki energii urządzeń. Zakładamy, że  $r_c = 14400$  [mAs].

$$E_{v_1} = \frac{567268 - 14400}{1600} = 345.543 \text{ [mAs]}$$

$$E_{v_2} = \frac{565085 - 14400}{1100} = 500.623 \text{ [mAs]}$$

Następnie, należy wyznaczyć wartości nadwyżki energii  $E_{v_1}$  oraz  $E_{v_2}$  dla urządzeń  $v_1$  i  $v_2$  zgodnie z formułą 5.2 wynosi:

$$E_{v_1}^+ = 345.543 - 103.452 = 242.091 \text{ [mAs]}$$

$$E_{v_2}^+ = 500.623 - 103.452 = 397.171 \text{ [mAs]}$$

Dla  $SF_{v_1g_{v_1}} = SF_{v_2g_{v_2}} = 7$ , wartości funkcji wagi 5.6  $\eta(w_1, v_1)$ ,  $\eta(w_1, v_2)$ , gdzie  $w_1 \in W$  i  $SF_{w_1v_1} = SF_{w_1v_2} = 7$

$$\eta(w_1, v_1) = \frac{242.091}{5.133} = 47.164$$

$$\eta(w_1, v_2) = \frac{397.171}{5.133} = 77.376$$

Zatem  $\eta(w_1, v_2) > \eta(w_1, v_1)$ . Wówczas dla węzła z ograniczoną łącznością z siecią  $w_1 \in W$ , węzeł  $v_2$  posiadający krótszy pozostały czas działania wypada lepiej od węzła  $v_1$ , który mógłby działać w trybie relay dłużej, ze względu na większą liczbę dni pozostałego czasu działania (o 500 dni) i wystarczająco dużą nadwyżkę energii.

W nawiązaniu do przykładu 2, wybór węzła  $v_2$  (z krótszym pozostałym czasem działania) do działania w trybie relay jest efektywny energetycznie, ponieważ pozwala na wykorzystanie zapasu energii urządzenia. Energia ta nie została by wykorzystana, gdyby do działania w trybie relay wybrany został węzeł  $v_1$ . Urządzenie z dłuższym pozostałym czasem działania może zostać wykorzystane do obsługi innych węzłów sieci o ograniczonej łączności z punktem dostępowym, które potencjalnie mogą pojawić się w przyszłości w ramach rozbudowy infrastruktury sieciowej. Jednak wybór urządzeń, ze zbyt krótkim pozostałym czasem działania skutkuje zwiększoną liczbą przełączeń urządzeń w tryb relay w przyszłości. Stąd zasadne jest ustalenie progu dla pozostałego czasu działania urządzenia  $t_v$ , poniżej którego węzły nie będą brane pod uwagę jako potencjalne do działania w trybie relay.

Na rysunku 5.1 przedstawiono dwuwymiarowy rozkład wartości funkcji wagi  $\eta$  (5.6) w zależności od wartości współczynnika SF potencjalnego węzła relay  $v \in P_R$  ( $SF_{vg_v}$ ) oraz współczynnika SF w komunikacji pomiędzy węzłem  $w \in W$  (o ograniczonej łączności z siecią) a potencjalnym węzłem relay  $v \in P_R$  ( $SF_{wv}$ ). Rozkład wartości funkcji wagi  $\eta$  (5.6) zaprezentowany na rysunku 5.1 demonstruje wpływ współczynnika SF na wartość tej funkcji tzn. na ocenę potencjału węzła  $v \in P_R$  do pełnienia funkcji węzła pośredniczącego dla węzła  $w \in W$  wymagającego przyporządkowania węzła relay. Wraz ze zmniejszaniem się obydwu wartości współczynników  $SF_{wv}$  i  $SF_{vg_v}$ , wartość funkcji wagi krawędzi  $\eta$  (5.6) wzrasta. Prezentowany wykres efektywnie uwydatnia różnice w wartościach funkcji wagi  $\eta$  (5.6), oddając niejednorodność przypadków, gdy  $SF_{wv} = n_1$ ,  $SF_{vg_v} = n_2$  oraz  $SF_{wv} = n_2$ ,  $SF_{vg_v} = n_1$ , gdzie  $n_1, n_2 \in \{7, 8, 9, 10, 11, 12\}$  i  $n_1 \neq n_2$ .

Rozkład wartości funkcji wagi  $\eta$  (5.6) przedstawiony na rysunku 5.1 został wygenerowany dla stałej wartości parametru nadwyżki energii  $E_v^+$ , aby w klarowny sposób uwidocznić wpływ istotnego w kontekście zużycia energii parametru transmisji – współczynnika SF w komunikacji pomiędzy węzłami sieci (dokładna wartość  $E_v^+$  nie jest istotna, ponieważ w przypadku jej zmiany charakterystyka i trend rozkładu zostaną zachowane).

		$\eta(w, v)$					
$SF_{wv}$	12	2.331	2.011	1.612	1.194	0.692	0.432
	11	3.623	2.904	2.139	1.461	0.774	0.463
	10	5.902	4.207	2.770	1.731	0.844	0.487
	9	7.615	5.009	3.097	1.853	0.872	0.496
	8	9.117	5.619	3.320	1.930	0.889	0.501
	7	10.237	6.025	3.458	1.976	0.898	0.504
			7	8	9	10	11
		$SF_{vg_v}$					

Rysunek 5.1: Rozkład wartości funkcji wagi krawędzi  $\eta$  (5.6) w zależności od wartości współczynników rozpraszania w komunikacji pomiędzy węzłem  $w \in W$  o ograniczonej łączności z siecią a potencjalnym węzłem relay  $v \in P_R$  ( $SF_{wv}$ ) oraz pomiędzy węzłem  $v$  a punktem dostępowym ( $SF_{vg_v}$ ).

## 5.4 Funkcja celu optymalizacji

Problem wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa można przedstawić w postaci problemu znalezienia skojarzenia (ang. matching) (definicja 1) o maksymalnej sumie wag spośród wszystkich skojarzeń o największej liczności w grafie ważonym. W szczególności, ograniczenie tego problemu do przypadku grafów dwudzielnych jest znane jako problem przyporządkowania (ang. assignment problem) – jeden z klasycznych problemów optymalizacji kombinatorycznej [36].

Definicja skojarzenia w grafie sformułowana jest w następujący sposób [112]:

**Definicja 1 (Skojarzenie)** *Skojarzeniem (ang. matching) ozn.  $M$  nazywamy podzbiór krawędzi grafu mający tę własność, że każdy wierzchołek jest końcem co najwyżej jednej krawędzi z  $M$ . Pary wierzchołków połączone bezpośrednio z krawędzią należącą do  $M$  są skojarzone przez  $M$ .*

Innymi słowy, skojarzenie to podzbiór krawędzi grafu, które są parami rozłączne.

Dla grafu  $G_H = (V_H, E_H, \eta)$  (5.4) (gdzie  $V_H = W \cup P_R$ ) skonstruowanego na podstawie danego zbioru  $W$  węzłów wymagających przyporządkowania węzłów relay; zbioru potencjalnych węzłów relay  $P_R$  wyznaczonego według

reguły 5.3 oraz funkcji wagi  $\eta$  określonej równaniem 5.6 – sformułowanie problemu wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w ujęciu matematycznym prezentuje się następująco:

**Problem 1** Dla grafu  $G_H = (V_H, E_H, \eta)$  5.4 należy znaleźć skojarzenie  $M \subset E_H$  będące wynikiem procedury optymalizacji o następującej funkcji celu:

$$\max \sum_{(w,v) \in E_H} \eta(w,v)x_{wv} \quad (5.7)$$

$$\sum_{w \in W} x_{wv} \leq 1, \forall v \in P_R \quad (5.8)$$

$$\sum_{r \in P_R} x_{wv} = 1, \forall w \in W \quad (5.9)$$

gdzie,  $\eta$  jest funkcją heurystyczną zdefiniowaną w równaniu 5.6,  $x_{wv}$  jest zmienną decyzyjną i  $x_{wv} \in \{0, 1\}$ , taką że jeśli  $x_{wv} = 1$  to krawędź  $(w, v) \in M$ , w przeciwnym wypadku (tj. dla  $x_{wv} = 0$ ) krawędź  $(w, v) \notin M$ .

Ponieważ wyższa wartość funkcji wagi  $\eta$  (5.6) krawędzi oznacza lepszą jakość połączenia reprezentowanego przez krawędź; celem optymalizacji jest maksymalizacja sumy wag krawędzi skojarzenia.

Należy zaznaczyć, że zdefiniowany problem optymalizacyjny (problem 1) jest w rzeczywistości jednym z podproblemów szerszego problemu jakim jest wybór lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa, ponieważ w swojej definicji (problem 1) uwzględnia elementy stanowiące rozwiązania innych podproblemów. Są nimi np. sformułowanie funkcji wagi krawędzi  $\eta$  (5.6), określenie kryterium wyznaczenia potencjalnych węzłów pośredniczących (5.3) spośród węzłów sieci, konstrukcja grafu potencjalnych węzłów relay, dobór odpowiednich parametrów i propozycja analiz (analiza budżetu energii 5.2) oddających cel optymalizacji. Rozwiązania podproblemów stanowiących elementy definicji problemu 1 zaproponowano w ramach rozprawy i opisano we wcześniejszej części tego rozdziału.

W literaturze znane są metody rozwiązujące problem przyporządkowania w czasie wielomianowym. Są to m.in. „metoda węgierska” (ang. Hungarian method) [35, 113] (MK) czy podejście Edmonds’a [114] (ED) – pierwsze, rozwiązujące problem maksymalnego skojarzenia w grafach ogólnych w czasie wielomianowym (graf ogólny czyli taki, który nie jest ograniczony do żadnego szczególnego rodzaju). Jako metodę rozwiązującą problem 1 sprawdzono podejście heurystyczne ze względu na korzyści związane z krótszym czasem wykonania (w porównaniu do algorytmów dokładnych) przy zapewnieniu akceptowalnej dokładności rozwiązania, co czyni je bardziej skalowalnym i odpowiednim dla dużych problemów.

## 5.5 Algorytm heurystyczny

Zaproponowano metodę heurystyczną zaprojektowaną i dostosowaną do specyfiki problemu wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa (sprowadzonego do problemu przyporządkowania – problem 1 w podrozdziale 5.4), opartą na Optymalizacji Kolonii Mrówek (ang. Ant Colony Optimization, ACO) [115]. Wybór algorytmu mrówkowego dla problemu przyporządkowania w grafie oparty jest o wzgląd na adaptacyjność tego podejścia w modelowaniu problemów grafowych i wykorzystania naturalnych analogii do struktur w grafie. Wierzchołki grafu reprezentują punkty decyzyjne, a krawędzie – możliwości przejścia między nimi. Przyporządkowanie (rozwiązanie) w grafie generowane jest za pomocą ścieżek [116] wyznaczanych przez mrówki w kolejnych iteracjach algorytmu heurystycznego opartego na optymalizacji koloni mrówek oznaczonego w dalszej części jako ACO.

---

**Algorytm 1** Algorytm heurystyczny ACO wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących dla węzłów o ograniczonej łączności z siecią wymagających przyporządkowania węzłów pośredniczących. Iteracyjne podejście, które jako dane wejściowe przyjmuje graf  $G_H = (V_H, E_H, \eta)$ , gdzie  $V_H = W \cup P_R$ , parametr  $t$  określający liczbę iteracji, parametr  $m$  określający liczbę mrówek. Procedura zwraca przyporządkowanie węzłów relay do węzłów o ograniczonej łączności z siecią (rozwiązanie dla problemu 1).

---

```

1: function ACO_RELAY_SELECTION( $G_H = (V_H, E_H, \eta)$ ,  $t$ ,  $m$ )
2:    $M_{best} \leftarrow \emptyset$            ▷ inicjalizacja wynikowego przyporządkowania
3:    $L_{best} \leftarrow -\infty$        ▷ inicjalizacja oceny wynikowego przyporządkowania
4:   for  $i \leftarrow 1$  to  $t$  do           ▷ dla  $i$ -tej iteracji
5:      $M(i) \leftarrow \emptyset$        ▷ inicjalizacja zbioru przyporządkowań znalezionych
     przez wszystkie mrówki w bieżącej iteracji
6:     for  $k \leftarrow 1$  to  $m$  do           ▷ dla  $k$ -tej mrówki
7:        $Avail^k(W)(i) \leftarrow W$ 
8:        $Avail^k(P_R)(i) \leftarrow \{1\}^{|P_R|}$            ▷ inicjalizacja zbioru
     nieodwiedzonych potencjalnych węzłów relay
9:        $M^k(i), L_M^k(i) = \text{GENERATE\_ANT\_PATH}(G_H, Avail^k(W)(i),$ 
      $Avail^k(P_R)(i))$  [2]           ▷ generowanie przyporządkowania
10:       $M(i) \leftarrow \{M^k(i), L_M^k(i)\}$ 
11:      if  $L_M^k(i) > L_{best}$  then
12:         $L_{best} = L_M^k(i)$ 
13:         $M_{best} = M^k(i)$            ▷ aktualizacja najlepszego wynikowego
     przyporządkowania
14:      for  $M \in M(i)$  do
15:        aktualizacja śladu feromonu według [5.11]
16:  return  $M_{best}$            ▷ zwrócenie najlepszego znalezionego
     przyporządkowania

```

---

Schemat działania algorytmu heurystycznego ACO rozwiązującego problem 1 zaprezentowano w pseudokodzie **Algorytm 1**. Jednym z kluczowych kroków algorytmu 1 jest wywołanie procedury generowania ścieżki (przyporządkowania) przez  $k$ -tą mrówkę w  $i$ -tej iteracji (**Algorytm 2**). Jednym z

---

**Algorytm 2** Procedura generowania ścieżki przez mrówkę. Zwraca przyporządkowanie węzłów o ograniczonej łączności z siecią do węzłów relay, znalezionych przez  $k$ -tą mrówkę w  $i$ -tej iteracji.

---

```

1: function GENERATE_ANT_PATH( $G_H = (V_H, E_H, \eta)$ ,  $Avail(W)^k(i)$ ,
    $Avail^k(P_R)(i)$ )
2:    $M^k(i) \leftarrow \emptyset$             $\triangleright$  inicjalizacja wynikowego przyporządkowania
3:    $L_M^k(i) \leftarrow 0$             $\triangleright$  inicjalizacja oceny wynikowego przyporządkowania
4:   while  $Avail(W)^k(i) \neq \emptyset$  do  $\triangleright$  dopóki istnieją nieodwiedzone węzły o
   ograniczonej łączności z siecią
5:     wybór losowego węzła  $w \in Avail^k(W)(i)$ 
6:     wybór węzła relay  $v \in N_{G_H}^k(i)$  na podstawie  $p_{wv}^k$  [5.10]
7:      $M^k(i) \leftarrow M^k(i) \cup \{(w, v)\}$ 
8:      $L_M^k(i) = L_M^k(i) + \eta(w, v)$   $\triangleright$  aktualizacja oceny przyporządkowania
9:      $Avail^k(W)(i) \leftarrow Avail^k(W)(i) \setminus \{w\}$ 
10:     $Avail^k(P_R)(i)[w] = 0$             $\triangleright$  aktualizacja zbioru dostępnych
   potencjalnych węzłów relay
11:  return  $M^k(i)$ ,  $L_M^k(i)$     $\triangleright$  zwrócenie najlepszego przyporządkowania
   wraz z sumą wag

```

---

punktów decyzyjnych w procedurze generowania ścieżki przez mrówkę jest wybór kolejnego węzła o ograniczonej łączności z siecią ze zbioru nieodwiedzonych jeszcze węzłów przez daną mrówkę w bieżącej iteracji. Wybór kolejnego węzła o ograniczonej łączności z siecią dokonywany jest w sposób losowy (linia 5 w algorytmie 2).

Mechanizm losowości wprowadza dodatkową warstwę eksploracji przestrzeni rozwiązań i zwiększa szanse na odkrycie nowych, niezbadanych jeszcze ścieżek. Zastosowanie elementu losowości pozwala zachować równowagę pomiędzy intensyfikacją (skupieniem się na obszarach potencjalnie optymalnych), a dywersyfikacją (eksploracją nowych obszarów rozwiązania). Dodatkowo uwzględnienie elementu losowości w procesie decyzyjnym umożliwia znalezienie rozwiązań w krótszym czasie.

Zastosowanie bardziej zaawansowanych mechanizmów wyboru kolejnego węzła o ograniczonej łączności z siecią podczas generowania ścieżki przez mrówkę mogłaby prowadzić do wydłużenia czasu działania algorytmu bez znaczącego wpływu na poprawę ostatecznych wyników. Wynika to z faktu, że metoda heurystyczna ACO z prostym mechanizmem losowego wyboru węzła o ograniczonej łączności z siecią daje podobne rezultaty pod względem efektywności energetycznej do algorytmów dokładnych, co potwierdzono w procesie ewaluacji metod opisanym w podrozdziale 5.6 (tabela 5.5). Stąd, za-

stosowanie bardziej skomplikowanych strategii wyboru węzła o ograniczonej łączności z siecią może nie przynieść znaczących korzyści, które usprawiedliwiałyby dodatkowe nakłady obliczeniowe.

Prawdopodobieństwo wyboru węzła  $v \in P_R$  przez  $k$ -tą mrówkę znajdującą się w wierzchołku  $w \in W$  w  $i$ -tej iteracji jest sformułowane w [115] i dane wzorem

$$p_{wv}^k(i) = \frac{[\tau_{wv}(i)]^\alpha [\eta(w, v)]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{wl}(i)]^\alpha [\eta(w, l)]^\beta}, \forall l \in N_u^k, \quad (5.10)$$

gdzie parametry  $\alpha$  i  $\beta$  pełnią funkcję sterowania intensywnością wpływu śladu feromonu oraz informacji pochodzącej z funkcji heurystycznej  $\eta$  (5.3.1), odpowiednio. Parametr  $N_i^k$  oznacza zbiór nieodwiedzonych sąsiednich wierzchołków węzła  $w$  dla  $k$ -tej mrówki w  $i$ -tej iteracji.

Funkcja odkładania feromonu stanowi kluczowy element mechanizmu inteligencji zbiorowej roju odpowiadając za proces wzajemnej komunikacji między agentami (mrówkami) w systemie. Pozwala ona algorytmowi dążyć do lepszych rozwiązań w kolejnych iteracjach i jest dana następującą formułą [115]:

$$\tau_{wv}(i+1) = (1 - \rho)\tau_{wv}(i) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{wv}^k(i) \quad (5.11)$$

$$\Delta\tau_{wv}^k(i) = \begin{cases} \frac{\eta(w, v)}{Q}, & (w, v) \in M^k(i) \\ 0, & (w, v) \notin M^k(i) \end{cases} \quad (5.12)$$

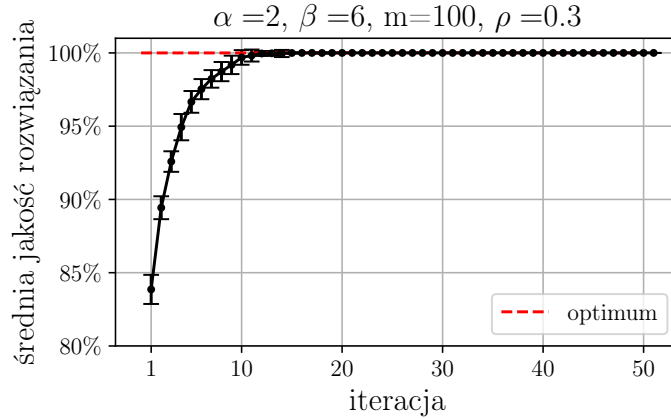
gdzie  $\rho \in (0, 1]$  – współczynnik parowania feromonu,  $Q = \max_{(w, v) \in E_H} \eta(w, v)$ . Taka strategia odkładania śladu feromonu nagradza krawędź na podstawie jej jakości w kontekście metryki  $\eta$  (5.6).

Na rysunku 5.2 przedstawiono średnią wartość i odchylenie standardowe jakości rozwiązań (5.13) znalezionych przez wszystkie mrówki w obrębie pojedynczej iteracji w kolejnych iteracjach algorytmu dla włączonej (rysunek 5.2a) i wyłączanej funkcji odkładania feromonu (5.2b) dla instancji problemu grafu pełnego  $G_H$ ;  $|W| = |P_R| = 100$ . Wartości parametrów heurystyki ACO zawarto w tytule wykresu.

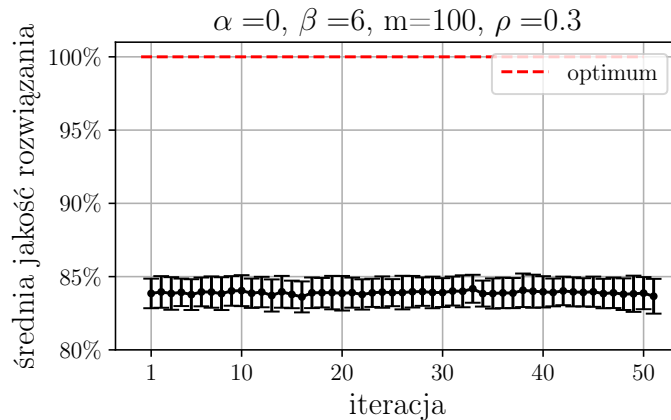
W celu precyzyjnej oceny skuteczności algorytmicznej zaproponowanej heurystyki ACO wyznaczono metrykę oceny jakości rozwiązania znajdowanego przez algorytm 1. Jakość rozwiązania określana jest za pomocą stosunku wartości sumy wag znalezionej do wartości sumy wag rozwiązania optymalnego, wyrażona w procentach:

$$\frac{\sum_{(w, r) \in M} \eta(w, r)}{\sum_{(w, r) \in M_{opt}} \eta(w, r)} \times 100\%, \quad (5.13)$$

gdzie  $M$  to rozwiązanie będące wynikiem metody heurystycznej ACO (algorytm 1), a  $M_{opt}$  to rozwiązanie optymalne.



(a) Włączona funkcja odkładania feromonu ( $\alpha \neq 0$ ).



(b) Wyłączona funkcja odkładania feromonu ( $\alpha = 0$ ).

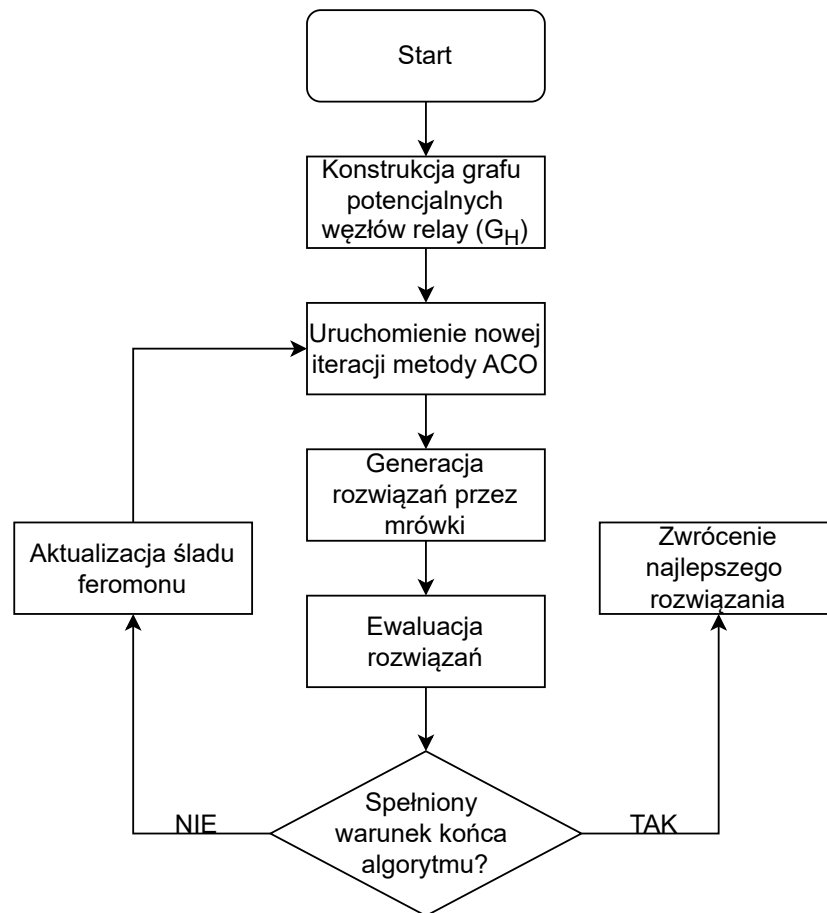
Rysunek 5.2: Średnia wartość i odchylenie standardowe jakości (5.13) rozwiązań znalezionych przez wszystkie mrówki w kolejnych iteracjach algorytmu ACO dla włączonej (wykres 5.2a) i wyłączonej (wykres 5.2b) funkcji odkładania feromonu (5.11) na podstawie 5.12. Przypadek testowy grafu pełnego  $G_H$ , gdzie  $|W| = |P_R| = 100$  oraz przykładowych wartości parametrów metody heurystycznej ACO. Zestawienie ukazuje wpływ zaproponowanej strategii odkładania feromonu na skuteczność heurystyki w znajdowaniu coraz lepszych rozwiązań w kolejnych iteracjach.

Metryką jakości rozwiązania 5.13 posłużono się do oceny mechanizmu odkładania śladu feromonowego 5.11 pod kątem zapewnienia skuteczności heurystyki w znajdowaniu coraz lepszych rozwiązań w kolejnych iteracjach algorytmu (rysunek 5.2a). Zaproponowany algorytm heurystyczny wykazuje skuteczność w znajdowaniu rozwiązań optymalnych lub suboptymalnych oraz osiąga zbieżność z mniejszą wariancją w wynikach w ramach postępu ko-



lejszych iteracji, co świadczy o skuteczności strategii odkładania feromonu. W przypadku braku uwzględnienia mechanizmu odkładania feromonu każda mrówka działa niezależnie, bez informacji z doświadczeń pozostałych mrówek, co ogranicza możliwość wykorzystania zbiorowej inteligencji roju do znajdowania lepszych rozwiązań (rysunek 5.2b).

Na rysunku 5.3 przedstawiono diagram ilustrujący ogólny schemat działania zaproponowanego algorytmu wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących z wykorzystaniem podejścia heurystycznego ACO.



?

Rysunek 5.3: Diagram ilustrujący schemat działania algorytmu wyboru lokalizacji węzłów relay z wykorzystaniem podejścia heurystycznego ACO.

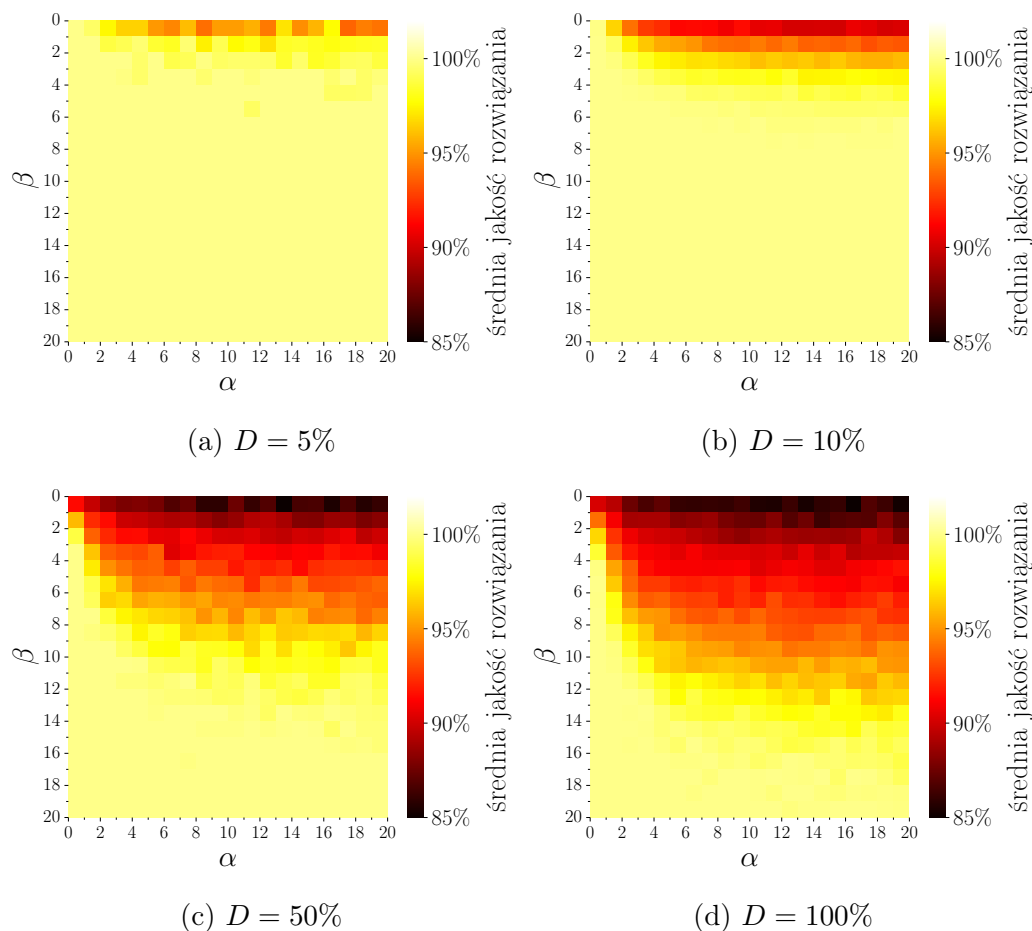
**Stabilność algorytmu** W celu oceny zaproponowanego algorytmu heurystycznego ACO pod względem stabilności tj. zdolności do generowania podobnych wyników przy niewielkich zmianach w danych wejściowych, przeprowadzono analizę z wykorzystaniem przypadków grafów testowych. Ich kon-

struktura polega na utworzeniu grafu dwudzielnego  $G_H = (V_H, E_H, \eta)$  (gdzie  $V_H = W \cup P_R$ ) uwzględniającego zbiór węzłów  $W$  wymagających przyporządkowania węzłów relay, zbiór potencjalnych węzłów relay  $P_R$  oraz zbiór krawędzi  $E_H$  wraz z określonymi przez funkcję  $\eta$  (5.6) wagami krawędzi. Liczba wierzchołków wynosi  $|V_H| = 200$  ( $|W| = |P_R| = 100$ ). Krawędzie w grafie dodawane są wyłącznie pomiędzy węzłami ze zbioru  $W$  a węzłami ze zbioru  $P_R$ , według odpowiednich reguł. Z kolei wagi krawędzi przypisane zostają z puli wartości przedstawionych na wykresie 5.1. Zbiór krawędzi  $E_H$  uwzględnia dokładnie jedno rozwiązanie optymalne tzn. przyporządkowanie o maksymalnej sumie wag, czyli uwzględniające zestaw krawędzi o wartościach wag równym najwyższej wartości spośród przedstawionych na wykresie 5.1, zapewniające pełne pokrycie węzłów ze zbioru  $W$ . Ponadto, do grafu dodane zostają krawędzie stanowiące szum tzn. te, o niższych wartościach wag, w ilości zdeterminowanej przez współczynnik gęstości  $D$  grafu, przy zapewnieniu takiego samego stopnia wierzchołka dla każdego węzła  $w \in W$ . Wagi kolejnych dodawanych do grafu krawędzi gorszej jakości losowane są z puli wartości z rysunku 5.1 zgodnie z rozkładem jednostajnym [110] (pomijając najwyższą wartość tj. 10.237). Tak skonstruowane grafy testowe posłużyły także do sprawdzenia zbieżności i czasu wykonania opisanych w kolejnej części rozdziału.

W przeprowadzonej analizie przyjęte wartości parametrów metody heurystycznej ACO są następujące: liczba mrówek wynosi 25 (złożoność czasowa algorytmu ACO zależy między innymi od liczby mrówek (jak zostanie pokazane w podrozdziale 5.5.1); wraz ze wzrostem liczby mrówek zwiększa się także czas działania algorytmu, dlatego nie rozważano dużej liczby). Liczba iteracji wynosi 100, ale działanie algorytmu może zostać zakończone wcześniej, ze względu na sprawdzanie warunku zakończenia działania algorytmu. Wykonanie procedury kończy się, gdy zostanie znalezione optymalne rozwiązanie (o ile istnieje) lub gdy różnica w jakości najlepszych rozwiązań pozostaje mniejsza lub równa  $10^{-15}$  przez kolejne 15 iteracji (wartość wybrana doświadczalnie).

Na rysunku 5.4 przedstawiono rozkłady średniej wartości jakości (5.13) rozwiązania osiąganego przez metodę ACO w zależności od rozmiaru danych wejściowych oraz wartości parametrów metody  $\alpha$  i  $\beta$ . Algorytm heurystyczny ACO wykazuje stabilność poprzez zdolność do generowania zbliżonych wyników, nawet jeśli dane wejściowe zostaną nieznacznie zmodyfikowane (np. przez dodanie niewielkiego szumu). Maksymalne odchylenie standardowe jakości rozwiązań wynosi 2.2% w całej populacji rozwiązań.

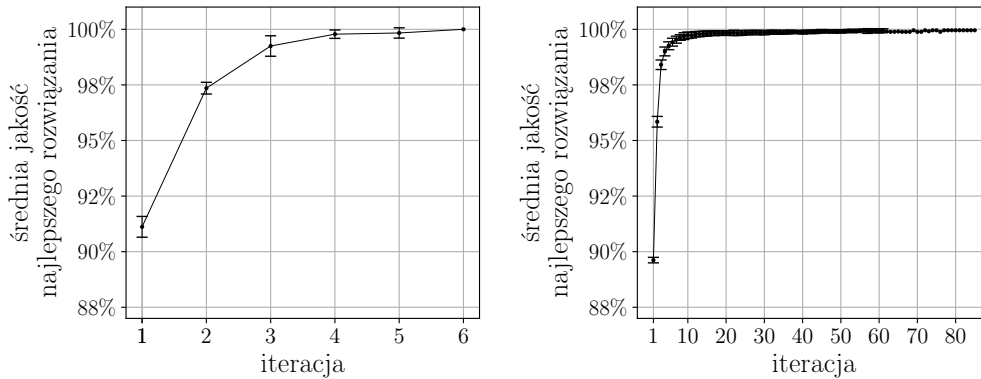
Wyniki przedstawione na rysunku 5.4 wskazują, że wraz ze wzrostem gęstości grafu odpowiedni dobór parametrów staje się bardziej istotny. W szczególności, wyższa wartość parametru  $\beta$  powinna być preferowana w odniesieniu do parametru  $\alpha$ . Wysokie wartości parametru  $\alpha$  w algorytmie ACO mogą prowadzić do nadmiernego polegania na śladach feromonowych, co może skutkować utknięciem w lokalnych optima i utrudniać eksplorację alternatywnych rozwiązań. Wyniki uzyskane dla różnych zestawów wartości parametrów mogą



Rysunek 5.4: Rozkład średniej wartości jakości rozwiązania (5.13) heurystyki ACO w zależności od gęstości  $D$  grafu potencjalnych węzłów relay  $G_H = (V_H, E_H, \eta)$ , gdzie  $V_H = W \cup P_R$  i  $|W| = |P_R| = 100$  oraz wartości parametrów heurystyki  $\alpha$  i  $\beta$ . Uwzględniono grafy o gęstości  $D \in \{5\%, 10\%, 50\%, 100\%\}$ .

się znacząco różnić w zależności od rozmiaru danych wejściowych. Zestaw wartości parametrów, który jest optymalny dla grafu o określonej gęstości, może okazać się niewystarczająco efektywny dla problemu o innym rozmiarze. W grafach o relatywnie dużej gęstości wysokie wartości parametru  $\beta$  stają się kluczowe, ponieważ podkreślają znaczenie informacji heurystycznej  $\eta$  w kierowaniu eksploracją przez mrówki. W gęstych grafach tj. przy relatywnie dużej liczbie krawędzi, mrówki mają więcej ścieżek do rozważenia. Zwiększenie wartości parametru  $\beta$  sprawia, że algorytm większą wagę przykładają do wartości funkcji heurystycznej  $\eta$  niż do informacji feromonowej. Wówczas algorytm w wyborze kolejnej krawędzi preferuje te z wysoką wartością funkcji heurystycznej  $\eta$  (5.6) co umożliwia mrówkom efektywne poruszanie się po strukturze grafu o relatywnie dużej liczbie krawędzi, potencjalnie prowadząc do szybszej zbieżności do optymalnych lub suboptymalnych rozwiązań.

**Zbieżność algorytmu** Na rysunku 5.5 przedstawiono średnią wartość i odchylenie standardowe jakości (5.13) najlepszego rozwiązania znalezionego w danej iteracji dla uruchomień algorytmu ACO dla populacji trzydziestu grafów testowych.



(a)  $|W| = |P_R| = 100$ ,  $|E_H| = 10^4$  (graf (b)  $|W| = |P_R| = 1000$ ,  $E_H = 10^5$  (gęstość grafu  $D = 10\%$ ))

Rysunek 5.5: Średnia wartość i odchylenie standardowe jakości (5.13) najlepszego rozwiązania w kolejnych iteracjach algorytmu ACO dla populacji trzydziestu losowych grafów testowych w obrębie pojedynczego scenariusza testowego.

Wyniki przedstawione na rysunku 5.5 zostały uzyskane dla takich samych parametrów metody heurystycznej ACO i dla danych wejściowych o różnych rozmiarach. W przypadku problemu o mniejszym rozmiarze (5.5a), algorytm znajduje rozwiązanie optymalne w krótszym czasie (maksymalnie w szóstej iteracji) niż w przypadku danych wejściowych o większym rozmiarze (5.5b). Wartości AUC (ang. area under the curve) wynoszą 81% dla krzywej z rysunku 5.5a oraz 98% dla krzywej z rysunku 5.5b. Wysokie wartości AUC świadczą o relatywnie szybkiej zbieżności heurystyki do rozwiązania optymalnego lub suboptymalnego dla zestawu parametrów metody dla których uzyskano rezultaty przedstawione na rysunku 5.5. Zaprezentowane wyniki na rysunku 5.5 (oraz 5.2) potwierdzają zbieżność heurystyki, a więc zdolność algorytmu do osiągania coraz lepszych wyników, zbliżając się do optymalnego lub najlepszego możliwego rozwiązania problemu w miarę przeprowadzania większej liczby iteracji lub kroków obliczeniowych.

### Czas wykonania algorytmu dla przykładowych danych wejściowych

W tabeli 5.1 przedstawiono wartości czasu CPU wykonania metod heurystycznej ACO oraz dokładnych MK oraz ED dla przykładowych grafów testowych  $G_{H_1}$ ;  $|W| = 10^3$ ,  $|P_R| = 10^4$  i gęstości  $D = 5\%$  ( $|E_H| = 5 \times 10^5$ ),  $G_{H_2}$ ;  $|W| = 10^3$ ,  $|P_R| = 10^4$  i gęstości  $D = 10\%$  ( $|E_H| = 10^6$ ),  $G_{H_3}$ ;  $|W| = 10^3$ ,  $|P_R| = 10^5$  i gęstości  $D = 5\%$  ( $|E_H| = 5 \times 10^6$ ),  $G_{H_4}$ ;  $|W| = 10^3$ ,  $|P_R| = 10^5$

i gęstości  $D = 10\%$  ( $|E_H| = 10^7$ ). Dane dotyczące czasów działania metod

Tablica 5.1: Średnia wartość czasu CPU (w sekundach) znalezienia przez algorytm rozwiązania o danej średniej jakości (%) dla każdej z metod ACO, MK, ED dla przypadków testowych grafów  $G_{H_1}, G_{H_2}, G_{H_3}, G_{H_4}$ . Wartości liczbowe występujące po znaku „±” to wartości odchylenia standardowego.

$G_{H_i}$	Średni czas CPU [s]			Średnia jakość rozwiązania (%)		
	ACO	MK	ED	ACO	MK	ED
$G_{H_1}$	$2.8 \pm 0.4$	$82.9 \pm 16.7$	$1782.1 \pm 266.6$	$99 \pm 0.001$	100	100
$G_{H_2}$	$5.4 \pm 0.03$	$78.9 \pm 2.6$	$3888.5 \pm 818.3$	$99 \pm 0.001$	100	100
$G_{H_3}$	$28.9 \pm 0.2$	–	$15296.3 \pm 222.5$	$98.9 \pm 0.001$	–	100
$G_{H_4}$	$56.3 \pm 0.5$	–	$41935.1 \pm 9772.1$	$98.9 \pm 0.001$	–	100

zostały uzyskane dla implementacji w języku Python, zrealizowanych przy użyciu biblioteki „Munkres” [117] w przypadku metody MK oraz implementacji algorytmu przyporządkowania w bibliotece „networkx” [118] w przypadku metody ED. Wyniki pokazują, że dla przypadków niektórych rozmiarów problemów podejście heurystyczne znajduje rozwiązanie bliskie optymalnemu w czasie krótszym niż niektóre implementacje metod dokładnych. W przypadkach zaprezentowanych w tabeli 5.1 podejście heurystyczne ACO jest bardziej efektywne, w szczególności w porównaniu do implementacji metody EK, ze względu na znacząco krótszy czas wykonania przy jednoczesnym uzyskaniu rozwiązania bliskiego optymalnemu.

Brak danych dla grafów  $G_{H_3}$  ( $5 \times 10^6$  krawędzi) i  $G_{H_4}$  ( $10^7$  krawędzi) w przypadku implementacji metody MK [117] oznacza zbyt długi czas oczekiwania na rozwiązanie w porównaniu do implementacji metod ACO oraz ED.

### 5.5.1 Złożoność obliczeniowa

Wyznaczono pesymistyczny czas działania zaproponowanego algorytmu wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących z wykorzystaniem podejścia heurystycznego ACO. Do opisu tego czasu posłużono się notacją asymptotyczną  $\mathcal{O}$  [119]. W procesie analizy złożoności czasowej algorytmu zidentyfikowano kluczowe operacje procedury tzn. instrukcje mające znaczący wpływ na wydajność czasową metody. Rozważono pesymistyczny scenariusz wykonania algorytmu tj. gdy wejściowy graf reprezentujący topologię sieci  $G = (V, E)$  jest pełny. W procesie analizy asymptotycznej skoncentrowano się na najbardziej dominujących czynnikach złożoności, ignorując stałe mnożniki i niższe rzędy wzrostu.

Algorytm wyboru lokalizacji węzłów relay obejmuje dwa kluczowe etapy działania.

1. Utworzenie grafu potencjalnych węzłów relay  $G_H = (V_H, E_H, \eta)$  – struk-

tury danych, która posłuży jako podstawa dla kolejnego etapu algorytmu.

- Dane wejściowe: Graf reprezentujący topologię sieci  $G = (V, E)$  2.12.
- Dane wyjściowe: graf potencjalnych węzłów relay  $G_H = (V_H, E_H, \eta) \subset G = (V, E)$ .

2. Uruchomienie algorytmu heurystycznego ACO (algorytm 1).

- Dane wejściowe: Graf potencjalnych węzłów relay  $G_H = (V_H, E_H, \eta)$  utworzony w etapie pierwszym;
- Dane wyjściowe: Przyporządkowanie  $M_{best} \subset E_H$  (wynik algorytmu 1).

W etapie 1. ma miejsce operacja iterowania po sąsiednich wierzchołkach węzłów ze zbioru  $W$  w celu wyznaczenia nadwyżki energii każdego z sąsiednich węzłów, której wartość powyżej pewnego progu klasyfikuje węzeł sąsiadujący jako potencjalny do działania w trybie relay, wyznaczenia wag krawędzi (za pomocą funkcji  $\eta$  zadanej wzorem 5.6) i w końcu, utworzenie grafu potencjalnych węzłów relay  $G_H = (V_H, E_H, \eta)$  uwzględniającego wyłącznie węzły ze zbioru  $W$  oraz potencjalne węzły do działania w trybie relay  $P_R$  ( $V_H = W \cup P_R$ ). Jeżeli każdy wierzchołek w grafie wejściowym  $G = (V, E)$  przechowuje atrybut określający, do jakiego zbioru należy, algorytm może bezpośrednio sprawdzać, czy dany wierzchołek należy do zbioru  $W$  podczas iteracji przez wszystkie wierzchołki ( $\mathcal{O}(V)$ ). Jeśli dany wierzchołek należy do zbioru  $W$ , wówczas sprawdzane jest jego sąsiedztwo ( $\mathcal{O}(WV)$ ). W takim przypadku złożoność obliczeniowa algorytmu to  $\mathcal{O}(V + WV)$ .

Jeśli natomiast zbiór  $W$  reprezentowany jest oddzielnie (w osobnej strukturze danych niż graf), nie jest konieczne przeglądanie całego grafu w celu identyfikacji wierzchołków należących do zbioru  $W$ . Zamiast tego, proces analizy koncentruje się wyłącznie na wyselekcjonowanych wierzchołkach, które są z góry określone jako należące do zbioru  $W$ . Dostęp do informacji o tych wierzchołkach pozwala bezpośrednio uzyskać ich sąsiedztwo, eliminując potrzebę iteracji przez całą strukturę grafu, co prowadzi do złożoności  $\mathcal{O}(WV)$ . Złożoność  $\mathcal{O}(WV)$  jest mniej pesymistyczna niż  $\mathcal{O}(V^2)$  (jeśli  $|W|$  jest znacząco mniejsze od  $|V|$ ), jednak odbywa się to kosztem zwiększonego zużycia zasobów pamięci, spowodowanego koniecznością przechowywania oddzielnej struktury danych zbioru  $W$ .

Złożoność obliczeniowa dla etapu 2. algorytmu została wyznaczona z uwzględnieniem rozmiarów obydwu zbiorów wierzchołków  $W$  oraz  $P_R$  grafu dwudzielnego  $G_H = (V_H, E_H)$ ,  $V_H = W \cup P_R$ .

Niech dane będą  $n_1 = |W|$ ,  $n_2 = |P_R|$  i  $n_1 \leq n_2$ . W poniższych rozważaniach zakładam, że każde wykonanie  $i$ -tego wiersza wymaga czasu  $c_i$ , gdzie  $c_i$  (koszt instrukcji) jest stałą [119].

Tablica 5.2: Koszt i krotność wykonania istotnych w sensie złożoności obliczeniowej instrukcji algorytmu 1.

instrukcja	koszt i krotność
7: $Avail^k(W)(i) \leftarrow W$	$c_1 \cdot n_1$
8: $Avail^k(P_R)(i) \leftarrow \{1\}^{ P_R }$	$c_2 \cdot n_2$
9: <b>Algorytm 2</b>	$c_3 \cdot (n_1 + 1) + c_4 \cdot \sum_{j=1}^{n_1} (j + n_2)$ (na podstawie tabeli 5.3)
15: aktualizacja poziomu feromonu [5.11]	$c_5 \cdot n_1$

Tablica 5.3: Koszt i krotność wykonania istotnych w sensie złożoności obliczeniowej instrukcji algorytmu 2 w pętli „while” 4.

instrukcja	koszt i krotność
4: while $Avail(W)^k(i) \neq \emptyset$	$c_3 \cdot (n_1 + 1)$
6: wybór węzła $w \in N_u^k(i)$ na podstawie $p_{wv}^k$ (5.10)	$c_6 \cdot \sum_{j=1}^{n_1} n_2$
9: $Avail^k(W)(i) \leftarrow Avail^k(W)(i) \setminus \{w\}$	$c_7 \cdot \sum_{j=1}^{n_1} j$

W przypadku instrukcji 4 w algorytmie 2, sprawdzenie czy lista jest pusta można dokonać poprzez klasyczne porównanie długości listy z zerem (w tym przypadku  $\mathcal{O}(n_1^2) = \mathcal{O}(W^2)$ ) lub w mniej pesymistyczny w sensie złożoności obliczeniowej sposób tzn. poprzez sprawdzenie czy pierwszy element listy jest pusty ( $\mathcal{O}(1)$ ). Dla liczby wykonań takiej operacji równej  $n_1 - \mathcal{O}(n_1)$ .

Czas działania algorytmu jest sumą czasów wykonania poszczególnych instrukcji:

$$T(n_1, n_2) = t \cdot (m \cdot (c_1 n_1 + c_2 n_2 + c_3 (n_1 + 1) + c_4 \sum_{j=1}^{n_1} (j + n_2)) + c_5 n_1), \quad (5.14)$$

gdzie

$$c_4 \sum_{j=1}^{n_1} (j + n_2) = c_4 \sum_{j=1}^{n_1} j + c_4 \sum_{j=1}^{n_1} n_2 = c_4 \frac{n_1 + 1}{2} n_1 + c_4 \cdot n_1 \cdot n_2, \quad (5.15)$$

$$c_4 \frac{n_1 + 1}{2} n_1 + c_4 \cdot n_1 \cdot n_2 = \mathcal{O}(n_1^2) + \mathcal{O}(n_1 \cdot n_2) = \mathcal{O}(n_1 \cdot n_2). \quad (5.16)$$

Przyjmując uproszczenie dotyczące rzędu wielkości funkcji, w analizie złożoności rozważane są jedynie najbardziej znaczące składniki we wzorze (w tym przypadku  $n_1 \cdot n_2$ ), ponieważ inne składniki niższego rzędu są nieistotne dla dużych argumentów. Pominięto także stałe współczynniki, ponieważ mają one mniejsze znaczenie niż rząd wielkości przy określaniu efektywności obliczeniowej algorytmów dla bardzo dużych danych [120]. Wówczas, asymptotyczny czas działania algorytmu ACO wynosi

$$T(n_1, n_2) = \mathcal{O}(t \cdot m \cdot n_1 \cdot n_2) = \mathcal{O}(t \cdot m \cdot W \cdot P_R) = \mathcal{O}(t \cdot m \cdot E_H). \quad (5.17)$$

Wówczas, pesymistyczny czas działania zaproponowanego algorytmu wyboru lokalizacji węzłów relay z wykorzystaniem podejścia ACO wynosi

$$\mathcal{O}(WV) + \mathcal{O}(t \cdot m \cdot W \cdot P_R). \quad (5.18)$$

Mówimy, że dany algorytm jest efektywniejszy od innego, jeśli jego pesymistyczny czas działania jest funkcją niższego rzędu. Jednak należy zaznaczyć, że z uwagi na stałe współczynniki i składniki niższych rzędów może to być niesłuszne dla danych wejściowych o małym rozmiarze [120].

W tabeli 5.4 przedstawiono pesymistyczny czas działania metod heurystycznej ACO oraz dokładnych ED i MK z pominięciem złożoności obliczeniowej dla procedury utworzenia grafu potencjalnych węzłów relay  $G_H$  (5.4) (posiadającej złożoność  $\mathcal{O}(WV)$ ), która generuje zestaw danych wejściowych dla rozpatrywanych metod (procedurę generowania grafu  $G_H$  potencjalnych węzłów pośredniczących opisano w podrozdziale 5.3).

Tablica 5.4: Złożoność obliczeniowa metod heurystycznej ACO oraz dokładnych MK [113] i ED [114].  $V_H = W \cup P_R$ .

Metoda	Złożoność obliczeniowa
ACO	$\mathcal{O}(t \cdot m \cdot E_H)$
MK [113]	$\mathcal{O}(\max(W, P_R)^3)$
ED [114] <sup>1</sup>	$\mathcal{O}(V_H^3)$

<sup>1</sup> [118]

W porównaniu do metod dokładnych (ED i MK), złożoność obliczeniowa algorytmu heurystycznego ACO nie zależy wyłącznie od liczby wierzchołków i krawędzi, ale także od parametrów metody tj. liczby iteracji  $t$  oraz liczby mrówek  $m$ . Algorytm ACO prezentuje się jako alternatywa dla metod dokładnych w przypadkach grafów rzadkich tzn. dla których  $|E|$  jest znacząco mniejsze niż  $|V|^2$  [120]. Dla odpowiednio małych wartości parametrów  $t$  oraz  $m$  złożoność obliczeniowa algorytmu heurystycznego ACO  $\mathcal{O}(t \cdot m \cdot E_H)$  może być mniej pesymistyczna niż złożoności metod dokładnych  $\mathcal{O}(\max(W, P_R)^3)$ ,  $\mathcal{O}(V_H^3)$ . Oznacza to, że w najgorszym przypadku jej czas działania rośnie wolniej w porównaniu do innych metod przy rosnącym rozmiarze danych.



## 5.6 Wyniki

W celu oceny efektywności zaproponowanego algorytmu wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa przeprowadzono serię eksperymentów symulacyjnych z wykorzystaniem testowej platformy symulacyjnej środowiska OMNeT++ z uwzględnieniem modelu symulacyjnego opisanych w rozdziale 4.1. Do oceny efektywności metod wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci zastosowano metrykę opisaną w podrozdziale 4.2. Przypomnijmy, że jest to miara poziomu zużycia energii (mierzona w mAs) w całej sieci, wyznaczonego w symulowanym okresie działania sieci, z uwzględnieniem zestawu węzłów działających w trybie relay wyznaczonych przez daną metodę.

Zaproponowane przeze mnie podejście do wyboru lokalizacji węzłów relay w sieci LoRa obejmuje utworzenie grafu potencjalnych węzłów relay (5.4) według reguł i kryteriów przedstawionych w podrozdziale 5.3, a następnie zastosowanie podejścia heurystycznego ACO (algorytm 1), które dla danych wejściowych w postaci grafu potencjalnych węzłów relay (5.4) zwraca rozwiązanie w postaci węzłów pośredniczących wraz z przyporządkowaniem do węzłów o ograniczonej łączności z siecią. W dalszej części pracy zaproponowane podejście wyboru lokalizacji węzłów relay obejmujące zarówno procedurę utworzenia grafu potencjalnych węzłów relay (5.4), jak i algorytm heurystyczny ACO (algorytm 1) oznaczono jako ACO\*. Analogicznie dla metod dokładnych ED [114] i MK [113] przyjęte oznaczenia to ED\* i MK\*, odpowiednio.

W procesie ewaluacji metod wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących sprawdzono skuteczność metody ACO\* (oraz dodatkowo, metod dokładnych MK\* i ED\*). Jako metodę referencyjną wykorzystano znaną w literaturze metodę optymalizacyjną wyboru lokalizacji węzłów relay [32] zoptymalizowaną pod względem oszczędzania energii.

Zbadano cztery różne scenariusze topologii sieci opisane w podrozdziale 4.3. Ponieważ analizowane scenariusze testowe zawierają elementy losowości, dla każdego scenariusza wygenerowano populację przypadków testowych o zadanej liczności  $n$ .

- R(1000, 3%), R(1000, 5%), rozmiar populacji  $n = 100$  (dla każdego scenariusza);
- R(1500, 3%), R(1500, 5%), rozmiar populacji  $n = 100$  (dla każdego scenariusza).

Jak opisano w podrozdziale 4.3.2 lokalizacje węzłów wymagających przyporządkowania węzłów pośredniczących są wybierane w sposób losowy, a ich liczba równa jest odsetkowi węzłów sieci wynoszącym 3% i 5% w rozpatrywanych scenariuszach topologii sieci. Topologia sieci ze wskazaniem węzłów wymagających przyporządkowania węzłów pośredniczących stanowi dane wejściowe dla metody optymalizacji wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących. Z kolei wynik optymalizacji stanowi dane wejściowe dla środowiska ewaluacji

metod opisanego w rozdziale 4, symulującego działanie sieci w konfiguracji wskazanej przez wynik metody wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących.

Przebieg pojedynczego eksperymentu symulacyjnego polega na wykonaniu czterech niezależnych symulacji działania sieci, oddzielnie dla każdej topologii sieci uwzględniającej wynikowy zestaw węzłów pośredniczących wskazanych przez daną metodę: ACO\*, MK\*, ED\*, algorytm referencyjny [32]. Wszystkie urządzenia końcowe rozpoczynają z pełnym naładowaniem baterii o pojemności 160 mAh, wartość ta stanowi budżet energetyczny na transmisję pakietów danych (160 mAh = 576 000 mAs jako parametr symulacji). Co 24 godziny następuje jednogodzinne okno transmisji pakietu.

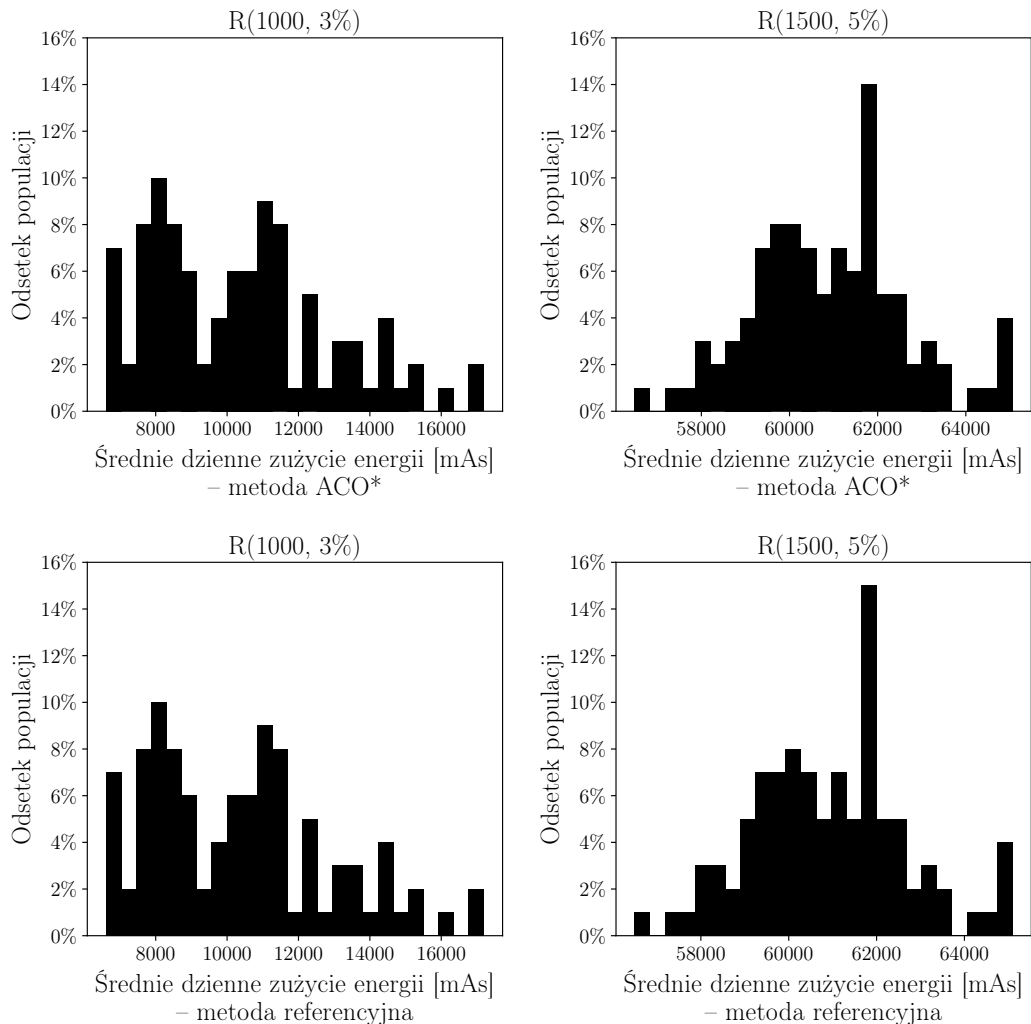
Na podstawie wyników symulacyjnych uzyskanych z wykorzystaniem środowiska ewaluacji opisanego w rozdziale 4 wyznaczono średnią wartość i odchylenie standardowe dziennego poziomu zużycia energii w całej sieci, uzyskanych dla różnych metod wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących: algorytmu heurystycznego ACO\* (oraz metod dokładnych MK\* i ED\*) oraz algorytmu referencyjnego [32], w różnych scenariuszach topologii sieci. Średnia wartość i odchylenie standardowe zostały wyznaczone dla populacji rozwiązań o liczności zdefiniowanej w zależności od rozpatrywanego scenariusza testowego. Wyniki zaprezentowano w tabeli 5.5.

Tablica 5.5: Średnia wartość i odchylenie standardowe dziennego poziomu zużycia energii (mAs) w całej sieci po upływie symulowanego czasu działania sieci równego 10 lat w różnych scenariuszach testowych dla metod wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących: ACO\*, MK\*, ED\* i metody referencyjnej [32].

Scenariusz testowy	ACO*	MK*	ED*	Referencyjny
R(1000, 3%)	10343.08 ± 2522.33	10343.07 ± 2522.34	10343.09 ± 2522.36	10342.83 ± 2522.20
R(1000, 5%)	10774.18 ± 2584.16	10774.16 ± 2584.19	10774.09 ± 2584.17	10774.28 ± 2584.36
R(1500, 3%)	61756.10 ± 1647.88	61755.18 ± 1647.44	61755.25 ± 1647.26	61757.04 ± 1646.94
R(1500, 5%)	60925.85 ± 1751.49	60924.18 ± 1750.68	60924.67 ± 1750.81	60929.92 ± 1751.09

Wyniki eksperymentów symulacyjnych wskazują, że w rozpatrywanych scenariuszach testowych uwzględniających liczbę węzłów sieci wynoszącą ponad 1000 urządzeń, oraz dla różnych wartości odsetka węzłów o ograniczonej łączności z siecią analizowane metody, mimo różnych mechanizmów działania, wykazują podobną skuteczność w znajdowaniu rozwiązań zoptymalizowanych pod względem minimalizacji zużycia energii w sieci. W efekcie, średnie wartości dziennego poziomu zużycia energii w sieci są zbliżone dla wszystkich

metod. Prezentowane wyniki potwierdzają także skuteczność zaproponowanej metody heurystycznej ACO\* w znajdowaniu rozwiązań zbliżonych do wyników uzyskiwanych przez metody MK\* i ED\*. Na rysunku 5.6 przedstawiono

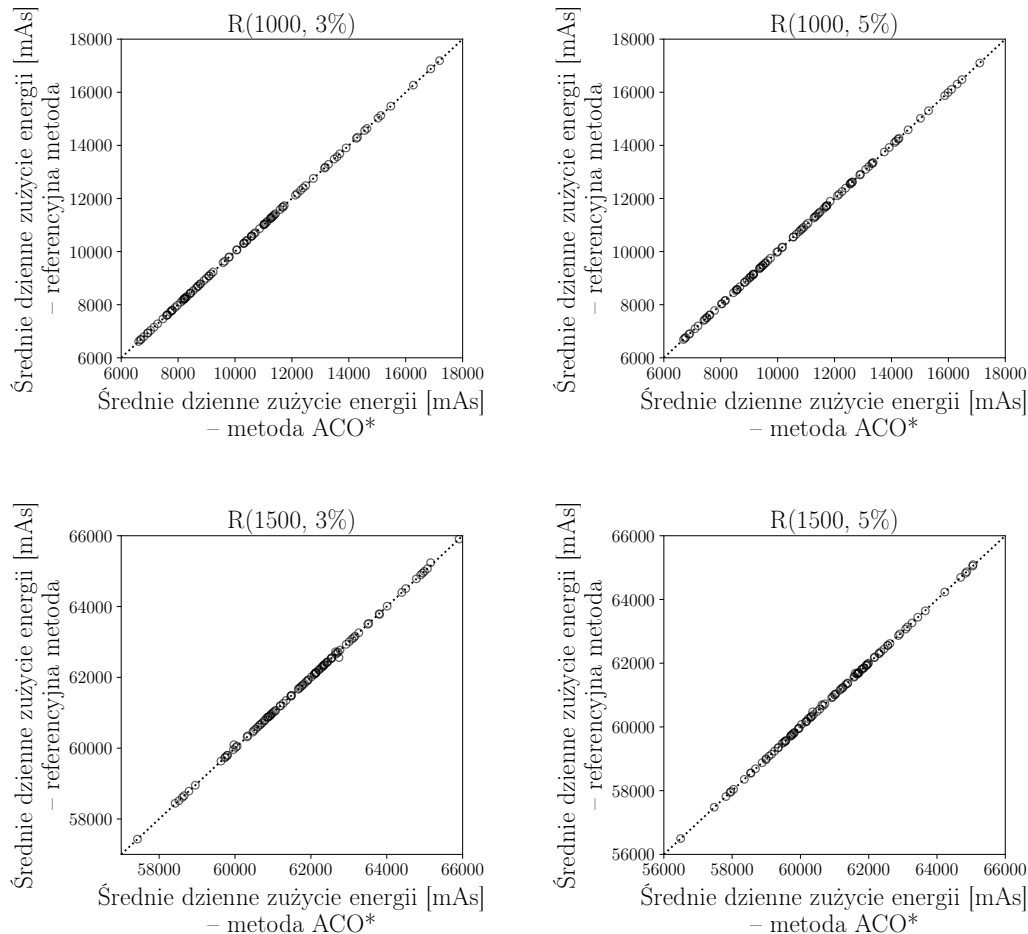


Rysunek 5.6: Histogramy średniej wartości dziennego poziomu zużycia energii w różnych scenariuszach testowych dla zaproponowanej metody ACO\* oraz metody referencyjnej [32]. Informacje te pochodzą z symulacji i można je wykorzystać do sprawdzenia prawdopodobieństwa większego lub mniejszego zużycia energii w sieci.

rozkłady średniej wartości dziennego poziomu zużycia energii w różnych scenariuszach testowych dla zaproponowanej metody heurystycznej ACO\* oraz algorytmu referencyjnego [32] (rozkłady dla metod dokładnych MK\* i ED\* mają podobną charakterystykę). Podobieństwo rozkładów średniej wartości dziennego poziomu zużycia energii dla różnych metod wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących wskazuje na ich równoważność w odnajdywaniu rozwiązań zapewniających podobny poziom zużycia energii w sieci w analizowanych

scenariuszach testowych.

Wykresy rozproszenia dla poszczególnych przebiegów symulacji w różnych scenariuszach testowych dla zaproponowanej metody z wykorzystaniem podejścia heurystycznego ACO\* oraz referencyjnej [32] przedstawiono na rysunku 5.7 (wykresy dla metod dokładnych MK\* i ED\* mają podobny charakter).



Rysunek 5.7: Wykresy rozproszenia średniej wartości dziennego poziomu zużycia energii w różnych scenariuszach testowych. Każdy wykres przedstawia wynik dla jednego scenariusza, przy czym każdy punkt odpowiada jednemu przebiegowi symulacji. Każdy przebieg opisany jest parą wartości: kosztem (średni dzienny poziom zużycia energii) dla zaproponowanej metody ACO\* i metody referencyjnej [32].

W tabeli 5.6 przedstawiono średnią wartość i odchylenie standardowe czasu działania metod wyboru lokalizacji węzłów relay w różnych scenariuszach testowych. W rozważanych scenariuszach testowych średni czas wykonania metody heurystycznej ACO\* jest krótszy niż w przypadku metody

referencyjnej [32], ale dłuższy niż czas wykonania metod dokładnych MK\* i ED\*. Czas wykonania algorytmu heurystycznego w przypadku problemów o stosunkowo małym rozmiarze może rzeczywiście być dłuższy niż czas działania metod dokładnych. Z kolei czasy działania metod dokładnych MK i ED są podobne dla rozpatrywanych scenariuszy testowych.

Tablica 5.6: Średnia wartość i odchylenie standardowe czasu CPU (w sekundach) działania różnych metod wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących: ACO\*, MK\*, ED\* oraz metody referencyjnej [32] w różnych scenariuszach testowych.

Scenariusz testowy	ACO*	MK*	ED*	Ref. [32]
R(1000, 3%)	$6.41 \pm 1.68$	$1.68 \pm 0.09$	$1.35 \pm 0.15$	$7.97 \pm 3.61$
R(1000, 5%)	$15.52 \pm 3.62$	$2.35 \pm 0.1$	$2.31 \pm 0.29$	$18.96 \pm 4.55$
R(1500, 3%)	$16.81 \pm 7.8$	$2.57 \pm 1.36$	$2.16 \pm 0.17$	$48.42 \pm 16.11$
R(1500, 5%)	$43.1 \pm 16.42$	$4.21 \pm 2.4$	$4.95 \pm 0.71$	$110.68 \pm 20.5$

**Analiza przypadku** Aby wykazać wyższą skuteczność proponowanego podejścia wyboru lokalizacji węzłów relay w sieci pod względem efektywnego zarządzania energią w sieci w porównaniu z metodą referencyjną [32], przeprowadzono eksperyment, w którym początkowy poziom naładowania baterii jest różny dla poszczególnych urządzeń sieci. W tym scenariuszu zakładamy, że instalator dobiera pojemność baterii tak, aby zapewnić funkcjonowanie urządzeń jako urządzenia końcowe, skonfigurowane do działania z daną wartością współczynnika SF przez cały czas działania sieci. Podstawowy poziom energii określany jest na podstawie modelu zużycia energii opisanego w 2.2 przy założeniu transmisji jednego pakietu na dobę. Dodatkowo, urządzeniom przyporządkowany zostaje pewien nadmiar energii o wartości losowanej zgodnie z rozkładem jednostajnym [110]. W rezultacie, różne urządzenia sieci otrzymują różnicowany poziom nadwyżki energii.

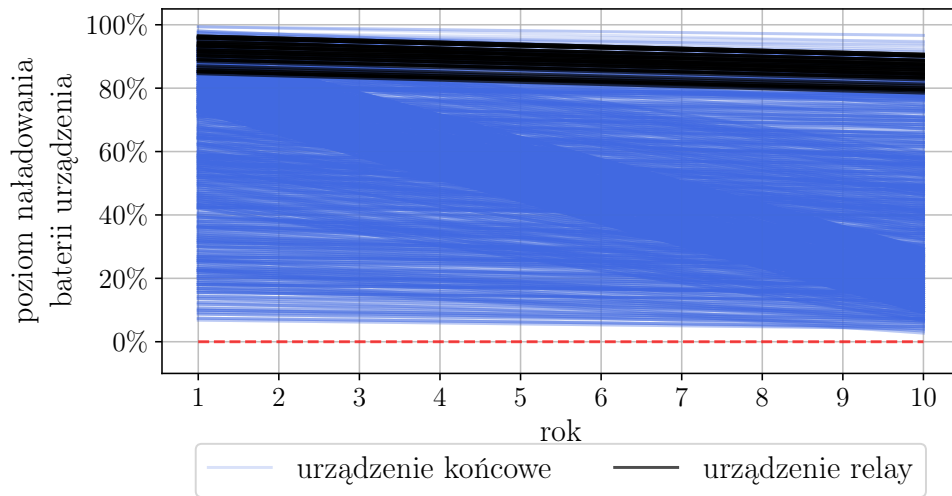
Na rysunku 5.8 przedstawiono wyniki symulacyjne dla scenariusza topologii R(1500, 3%) z uwzględnieniem zróżnicowanego początkowego poziomu naładowania baterii urządzeń sieci przydzielonego zgodnie z wyżej wymienionymi regułami. Rysunek 5.8 ilustruje zmianę poziomu naładowania baterii urządzeń w symulowanym okresie działania sieci równym 10 lat dla czterech niezależnych przebiegów symulacji różniących się zestawem węzłów relay wybranych przez metody ACO\*, MK\*, ED\* oraz metodę referencyjną [32].

Mimo, że metoda referencyjna również optymalizuje wybór węzłów relay pod względem możliwie najmniejszego zużycia energii w sieci, to wybiera węzły obciążone ryzykiem wyczerpania baterii przed zakończeniem czasu działania sieci (rysunki 5.8d, 5.9). Metoda referencyjna [32] analizuje dobór węzłów relay w oparciu o miarę poziomu sygnału (SNR 2.2) oraz kryterium odle-

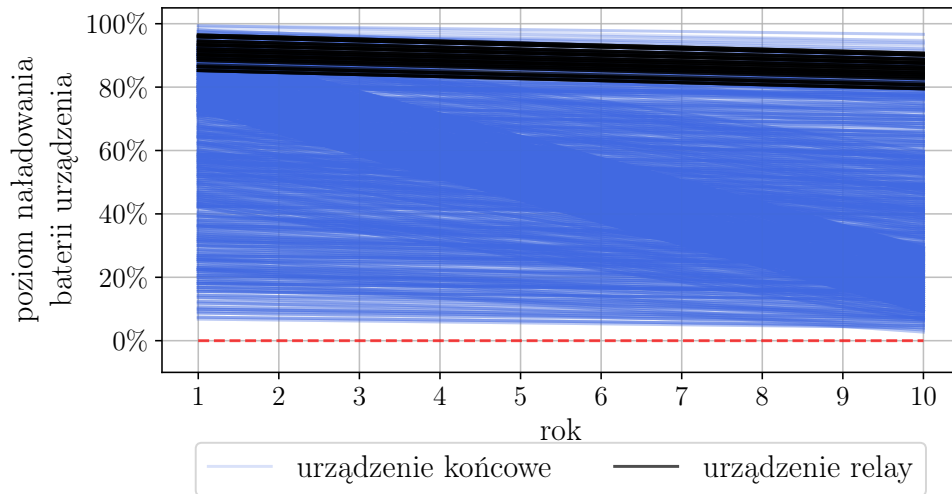
głości pomiędzy urządzeniami nie uwzględniając analizy czynnika poziomu naładowania baterii urządzenia. Natomiast zaproponowane w niniejszej rozprawie podejście optymalizuje wybór lokalizacji węzłów relay zarówno poprzez analizę parametrów węzła sieci (poziom naładowania baterii, wartość współczynnika SF) jak i wskazanie przyporządkowania będącego wynikiem minimalizacji kosztu energetycznego związanego z obsługą węzłów o ograniczonej łączności z siecią przez węzły pośredniczące. W efekcie, wybór ten charakteryzuje się bardziej efektywnym energetycznie zarządzaniem energią w sieci i przyczynia się do zwiększenia niezawodności w działaniu sieci poprzez zapobieganie wyczerpywania baterii urządzeń.

Węzły sieci, którym został przyporządkowany relatywnie niewielki poziom nadmiarowej puli energii, zużywają prawie całą dostępną energię i pod koniec czasu działania sieci ich pozostały poziom energii jest bliski zeru, ponieważ początkowy poziom naładowania baterii uwzględniał poziom energii niewiele większy od wartości potrzebnej do pracy urządzenia końcowego w rozpatrywanym czasie działania sieci.

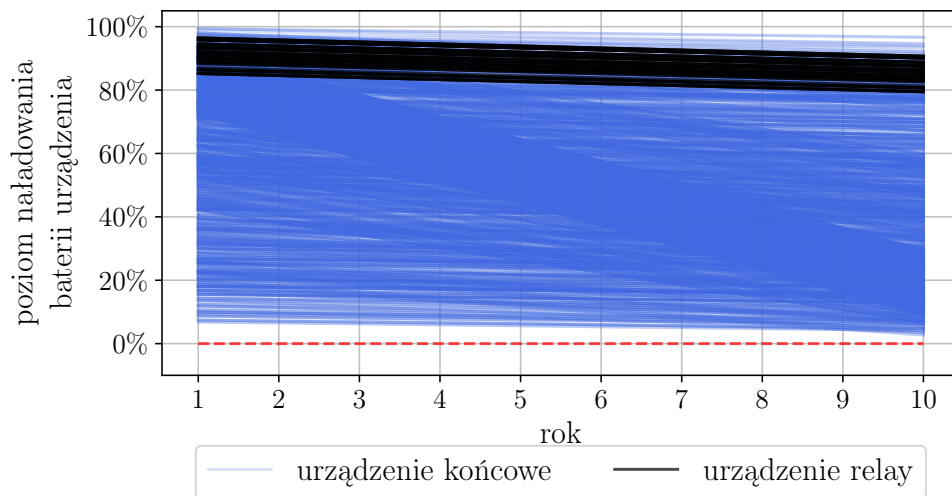
Zaproponowana metoda heurystyczna ACO\* (podobnie jak metody MK\* i ED\*) do działania w trybie relay wskazuje węzły z dużym zapasem energii, w przeciwieństwie do metody referencyjnej [32], która w swoim działaniu nie uwzględnia czynnika poziomu naładowania baterii urządzenia. Widoczne na wykresach z rysunku 5.8 krzywe prezentujące zmianę poziomu naładowania baterii urządzenia (a więc zmianę poziomu energii urządzenia) w czasie dla węzłów relay wskazanych przez zaproponowane metody, zaczynają się od wysokich wartości poziomu naładowania baterii (oś Y). Ponadto, zaproponowane metody ACO\*, MK\*, ED\* do działania w trybie relay wybierają węzły o niskich wartościach współczynnika SF w komunikacji zarówno pomiędzy węzłem relay a bramą LoRa jak i węzłem relay a przypisanym mu węzłem o ograniczonej łączności z siecią. O takim wyborze świadczy łagodne nachylenie krzywej zmiany poziomu naładowania baterii urządzenia w czasie i efekt ten można zaobserwować na wykresie 5.8. Taka charakterystyka w wyborze węzłów relay widoczna jest także dla metody referencyjnej [32].



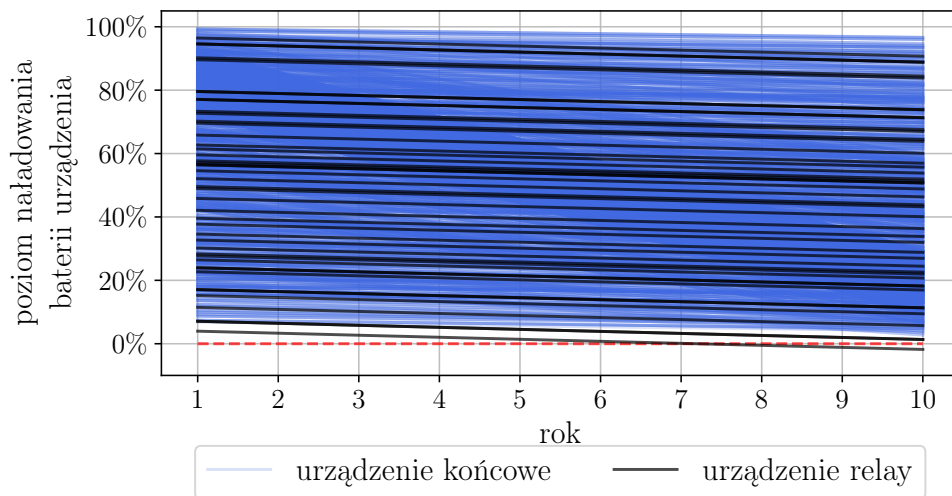
(a) metoda ACO\*



(b) metoda MK\*

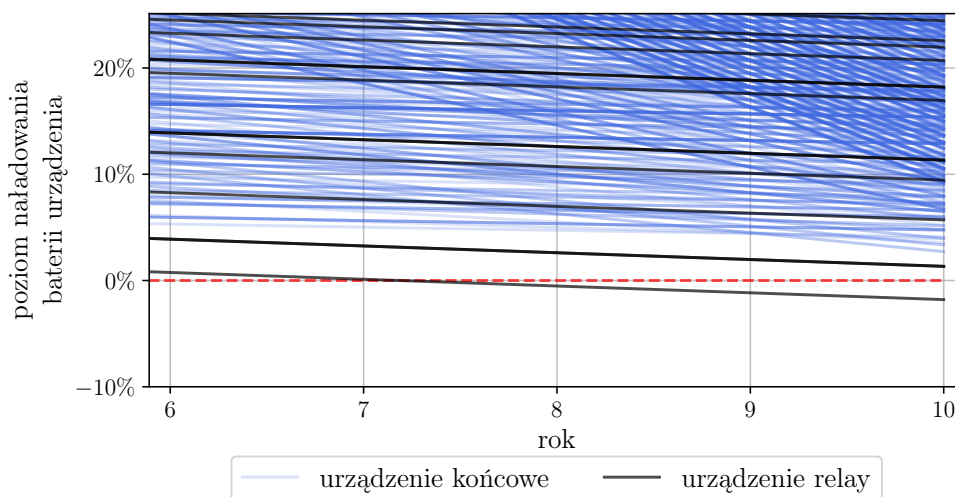


(c) metoda ED\*



(d) Kontynuacja rysunku. Metoda referencyjna [32]. Krzywa na dole wykresu osiągająca wartości poniżej zera w siódmym roku symulowanego okresu działania sieci odpowiada węzłowi relay, którego bateria uległa wyczerpaniu. Wersja wykresu w powiększeniu została zaprezentowana na rysunku 5.9.

Rysunek 5.8: Zmiana poziomu naładowania baterii urządzenia w trakcie symulowanego okresu działania sieci równego 10 lat. Każda krzywa odpowiada przebiegowi zużycia energii pojedynczego węzła sieci. Kolorem czarnym wyszczególniono węzły działające w trybie relay wskazane przez metody wyboru lokalizacji węzłów relay (a) ACO\*; (b) MK\*; (c) ED\*; (d) referencyjną [32].



Rysunek 5.9: Rysunek ilustrujący powiększenie fragmentu z rysunku 5.8d uwzględniającego zmianę poziomu naładowania baterii w czasie dla urządzenia w węzle sieci wskazanym przez metodę referencyjną do działania w trybie relay, którego bateria uległa wyczerpaniu.



## 5.7 Podsumowanie

Zaproponowane podejście do optymalizacji wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa obejmuje zestaw autorskich procedur uwzględniających kryteria oraz parametry istotne dla charakterystyki środowiska technologii LoRa w ujęciu ukierunkowanym na zapewnienie możliwie najlepszej efektywności energetycznej sieci. Zaproponowana metoda zwraca zestaw lokalizacji węzłów relay wraz z przyporządkowaniem do węzłów o ograniczonej łączności z siecią, stanowiące wynik celu optymalizacji. W ramach własnej pracy badawczej zaproponowałam nową funkcję (5.6) dla procedury optymalizacji, wyrażającą ocenę potencjału węzła sieci do działania w trybie relay. Funkcja oceny uwzględnia poziom nadwyżki energii urządzenia zasilanego baterią; wartość współczynnika SF mającego wpływ na poziom zużycia energii podczas transmisji pakietu oraz koszt energetyczny związany z obsługą węzła o ograniczonej łączności z siecią. Koszt ten analizowany jest na podstawie wartości współczynnika SF w komunikacji pomiędzy urządzeniami. W efekcie, wynikowe węzły wskazane do działania w trybie relay charakteryzują się wysoką nadwyżką energii oraz niską wartością współczynnika SF. Z kolei przyporządkowanie do węzłów o ograniczonej łączności z siecią, zoptymalizowane jest pod względem minimalizacji kosztu energetycznego związanego z utrzymaniem łączności z siecią dla węzłów o ograniczonej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym. Takie podejście pozwala na efektywne zarządzanie energią w sieci, co istotne w kontekście zastosowań urządzeń zasilanych baterią w technologii LoRaWAN w aplikacjach IoT. Urządzenia z większym zapasem energii i niskim współczynnikiem SF mogą dłużej zapewnić ciągłość działania i utrzymanie łączności dla węzłów niemogących skutecznie komunikować się z siecią. Także przyporządkowanie węzłów relay do węzłów o ograniczonej łączności z siecią ukierunkowane na możliwie najmniejsze zużycie energii przyczynia się do maksymalizacji żywotności baterii, a w efekcie wydłużenia czasu życia sieci.

Zaproponowane podejście umożliwia bardziej efektywne – w porównaniu z metodą referencyjną [32] – zarządzanie energią w sieci, dzięki uwzględnieniu analizy poziomu naładowania baterii urządzenia, podczas gdy metoda referencyjna nie bierze pod uwagę tego czynnika w ogóle. Wybór lokalizacji węzłów z możliwie największym zapasem energii jako węzły pośredniczące czyni zaproponowane podejście bardziej skutecznym pod względem zapewnienia efektywności energetycznej sieci także w porównaniu do metod z literatury [28, 29] realizujących dobór węzłów relay w sieci wyłącznie w oparciu o miarę poziomu sygnału radiowego (wskaźnik SNR 2.2). Mimo korzystnych parametrów dotyczących transmisji, urządzenie może nie dysponować wystarczającymi zasobami energii do działania w trybie relay i w wyniku wybrania go do pełnienia tej funkcji może mieć miejsce przerwanie ciągłości operacyjnej urządzenia spowodowane wyczerpaniem baterii przed upływem przewidywanego okresu czasu, a w konsekwencji utrata danych. Stąd, istotnym aspektem

zapropozowanej metody jest uwzględnienie kryterium zapasu energii w węzle sieci wyznaczonego na podstawie analizy poziomu naładowania baterii urządzenia wraz z zachowaniem ograniczeń związanych ze zużyciem energii.

Wyniki eksperymentów symulacyjnych wskazują na skuteczność zaproponowanego podejścia wyboru lokalizacji węzłów relay w dążeniu do minimalizacji zużycia energii w sieci, która działając w konfiguracji wskazanej przez wynikowe przyporządkowanie węzłów pośredniczących charakteryzuje się zminimalizowanym zużyciem energii potrzebnej do obsługi węzłów o ograniczonej łączności z siecią przy zapewnieniu pełnego pokrycia niezależnie od ich lokalizacji i dla różnych wartości odsetka takich węzłów w sieci. Wyniki eksperymentów symulacyjnych wskazują na równoważność zaproponowanego podejścia i metody referencyjnej [32] w kontekście minimalizacji zużycia energii w sieci. Nie mniej jednak, uwzględnienie w procesie przyporządkowania węzłów pośredniczących analizy współczynnika SF, wpływającego na zużycie energii podczas transmisji pakietów, pozwala odzwierciedlić rzeczywiste warunki propagacyjne w środowisku technologii LoRa, w przeciwieństwie do kryterium odległości, na którym bazują – częściowo metoda referencyjna [32] oraz w pełni metoda [27].

Problem wyboru lokalizacji węzłów relay w sieci LoRa rozważono jako problem znalezienia przyporządkowania w grafie. W celu rozwiązania postawionego problemu zaproponowano podejście heurystyczne oparte na optymalizacji kolonii mrówek, które pozwala na uzyskanie efektów bliskich optymalnym dla badanego zagadnienia, w czasie krótszym niż metody dokładne dla przykładowych rozmiarów problemów. Algorytm heurystyczny prezentuje się jako alternatywa dla rozpatrywanych metod dokładnych dla zastosowań w przypadkach grafów rzadkich tzn. dla których  $|E|$  jest znacząco mniejsze niż  $|V|^2$  [120]. Dla odpowiednio małych wartości parametrów  $t$  i  $m$  złożoność obliczeniowa algorytmu heurystycznego (ACO)  $\mathcal{O}(t \cdot m \cdot W \cdot P_R)$  może być mniej pesymistyczna niż złożoność implementacji niektórych metod dokładnych wymienionych w treści rozdziału (MK –  $\mathcal{O}(\max(W, P_R)^3)$  i ED –  $\mathcal{O}(V_H^3)$ , gdzie  $V_H = W \cup P_R$ ).

Zaproponowane podejście wykazuje potencjał do zastosowań dla wdrożeń, gdzie urządzenia stosunkowo często transmitują pakiety (np. systemy parkingowe). Przyporządkowanie węzłowi pośredniczącemu dokładnie jednego węzła o ograniczonej łączności z siecią; promowanie do działania w trybie relay węzłów z jak największą nadwyżką energii oraz niskim kosztem energetycznym związanym z utrzymaniem łączności przyczyniają się do maksymalizacji żywotności baterii urządzeń, a więc maksymalizacji czasu życia sieci. Opracowane metody i spostrzeżenia dotyczące optymalizacji wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa – opisane w niniejszym rozdziale – posłużyły jako fundament do powstania bardziej zaawansowanego rozwiązania opisanego w dalszej części pracy w rozdziale 6. Ponadto, opisane w niniejszym rozdziale rezultaty są rozszerzeniem prac zaprezentowanych w artykule [37], którego jestem współautorką.

## Rozdział 6

# Adaptacyjna metoda wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w zmiennych warunkach

Prace nad metodami wyboru lokalizacji węzłów relay w sieci LoRa opisane w rozdziale 5 posłużyły jako fundament dla opracowania bardziej kompleksowego rozwiązania, które nie tylko odpowiada na wcześniej zidentyfikowane wyzwania (np. związane z zachowaniem ograniczeń dotyczących zużycia energii w urządzeniu), ale obejmuje nowy mechanizm zaprojektowany do cyklicznego uruchamiania w celu okresowej rekonfiguracji sieci w odpowiedzi na zmieniające się warunki propagacji sygnału radiowego. Ponadto, zaproponowane podejście unika niepotrzebnej nadmiarowości w wyborze lokalizacji węzłów do działania w trybie relay.

Podstawowym problemem do rozwiązania jest, że dla danego zbioru węzłów sieci o słabej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym, należy wybrać lokalizacje węzłów do działania w trybie relay, aby wybór ten był zoptymalizowany pod względem zapewnienia jak najlepszej efektywności energetycznej sieci. W efekcie, sieć działająca w konfiguracji określonej przez wskazany zestaw lokalizacji węzłów relay ma charakteryzować się efektywnym energetycznie wykorzystaniem zasobów i jak najmniejszym zużyciem energii przez urządzenia.

W końcowym etapie prac rozpatrzono uogólnienie problemu wyboru lokalizacji węzłów relay tj. z uwzględnieniem redundancji w wyborze węzłów pośredniczących.

### 6.1 Analiza budżetu energii urządzenia

Celem algorytmu jest znalezienie takiego zestawu lokalizacji węzłów do działania w trybie relay w sieci, aby zapewnić jak najmniejsze zużycie energii w węzłach sieci, możliwie najdłuższy czas działania sieci i pełne pokrycie dla węzłów o ograniczonej łączności z siecią. Optymalizowanym przez proponowany

algorytm zasobem głównym jest energia, co istotne w kontekście zastosowań urządzeń zasilanych baterią w LoRaWAN w aplikacjach IoT. Podobnie jak w poprzednim rozdziale (rozdział 5), w niniejszych rozważaniach skupiono się przede wszystkim na istotnych w sensie zużycia energii fazach związanych z przesyłaniem pakietu czyli na transmisji oraz nasłuchu. W większości sieci LPWAN zużycie energii podczas transmisji zależy od warunków propagacji sygnału radiowego i odległości do punktu docelowego. Szczególnie w standardzie LoRa, koszt energetyczny poświęcony na transmisję pakietu zależy od wartości współczynnika SF; niższa wartość SF oznacza mniejsze zapotrzebowanie na energię, co wyjaśniono w sekcji 2.1 opisującej znaczenie współczynnika rozpraszania SF w kontekście wpływu na poziom zużycia energii w urządzeniu. Wartość współczynnika rozpraszania SF jest związana z warunkami propagacji sygnału, zależy od warunków środowiskowych i nie może zostać jednoznacznie przewidziana. Stąd, standardy produkcyjne zakładają wyposażenie urządzeń w baterię o pojemności wystarczającej do utrzymania łączności w najbardziej pesymistycznym energetycznie scenariuszu. Początkowy budżet energii urządzenia związany jest z kosztem energetycznym umożliwiającym komunikację urządzenia w najgorszym przypadku, przy SF=12.

W ramach rozważań w niniejszym rozdziale, dzienne maksymalne zużycie energii podczas transmisji pojedynczego pakietu oznaczane jest jako  $E_{max}$  i jest to pesymistyczny koszt energii związany z transmisją pojedynczego pakietu przy wartości współczynnika rozpraszania SF=12. Zaproponowany w niniejszym rozdziale algorytm bierze pod uwagę dzienne zapotrzebowanie urządzenia na energię, zarówno jako ilość energii potrzebnej na  $t$  dni ( $tE_{max}$ ), jak i liczbę dni transmisji, przez które urządzenie pozostaje aktywne  $\left(\frac{b_v}{E_{max}}\right)$ . Takie podejście pozwala na uwzględnienie ograniczeń związanych ze zużyciem energii przez urządzenie końcowe sieci. Ponadto, algorytm bierze pod uwagę poziom zużycia energii związany z obsługą węzła o ograniczonej łączności z siecią przez urządzenie działające w trybie relay. Ma to znaczenie na etapie identyfikacji obszaru działania węzła w sieci w procesie wyboru lokalizacji węzłów relay zoptymalizowanym pod kątem minimalizacji zużycia energii w sieci.

- Dzielne zużycie energii  $E_{vr}^*$ , które obejmuje dzielne zużycie energii przez urządzenie działające w trybie relay podczas transmisji oraz nasłuchu pakietów od węzła o ograniczonej łączności z punktem dostępowym.
- Dzielne zużycie energii potrzebne na transmisję pojedynczego pakietu  $E_r^*$  węzła relay.

Wartości parametrów  $E_r^*$  i  $E_{vr}^*$  zależą od wartości współczynników rozpraszania w komunikacji pomiędzy potencjalnym węzłem relay  $r$  a bramą LoRa ( $SF_{rg_r}$ ) oraz w komunikacji pomiędzy potencjalnym węzłem relay a węzłem o ograniczonej łączności z siecią ( $SF_{vr}$ ).

Tablica 6.1: Wartości funkcji  $f$  (6.2) dla przykładowych wartości parametrów.

Węzeł id	Pozostały czas $t_{v_i}$	Nadwyżka energii $E_{v_i}^+$	SF $SF_{v_i g_{v_i}}$	Funkcja oceny $f(v_i)$ (6.2)
$v_1$	100	800	7	256
$v_2$	400	800	7	64
$v_3$	100	100	7	32
$v_4$	800	800	7	32
$v_5$	100	800	12	8

### 6.1.1 Funkcja oceny węzła do działania w trybie relay

W celu oceny potencjału węzła końcowego sieci do działania w trybie relay sformułowano funkcję  $f$  (6.2) uwzględniającą odpowiednie parametry oraz kryteria istotne w kontekście zapewnienia efektywności energetycznej sieci. Funkcja ta służy jako narzędzie umożliwiające porównywanie węzłów końcowych sieci do działania w trybie relay, wspomagając proces decyzyjny dotyczący wyboru zestawu lokalizacji węzłów do działania w trybie relay w sieci zoptymalizowanego pod względem efektywności energetycznej sieci.

Decyzja dotycząca przypisania funkcji węzła pośredniczącego do węzła końcowego sieci opiera się głównie na wskaźniku nadwyżki energii, jaką posiada ten węzeł. Nadwyżka energii dla danego węzła  $v$  jest określana wzorem:

$$E_v^+ = \frac{b_v - E_{max}^{t_v} - r_c}{t_v}, \quad (6.1)$$

gdzie  $E_{max}^{t_v} = t_v \cdot E_{max}$  to niezbędny poziom energii określony na pozostały czas operacyjny urządzenia. Parametr  $r_c$  jest kosztem energetycznym jaki urządzenie ponosi w momencie przełączenia w tryb relay. Wielkość wartości  $E_v^+$  wyrażona jest w liczbie dni.

Ostatecznie, nadwyżka energii węzła jest różnicą między aktualnym poziomem naładowania baterii, poziomem energii wymaganej do funkcjonowania urządzenia przez oczekiwany czas działania, a ustalonym kosztem energetycznym przełączenia w tryb relay. Poziom energii związany z przełączeniem urządzenia końcowego w tryb relay jest uwzględniany jednorazowo wyłącznie w sytuacji, gdy węzeł zostaje wyznaczony do działania w tym trybie. Koszt energetyczny związany z wyjściem urządzenia z trybu relay jest znikomy, dlatego nie jest uwzględniany.

Nadwyżka energii  $E_v^+$  jest czynnikiem występującym w funkcji oceny potencjału węzła końcowego sieci do działania w trybie relay. Dodatkowo, uwzględniona zostaje wartość współczynnika rozpraszania  $SF_{v g_v}$  w komunikacji pomiędzy potencjalnym węzłem relay a bramą LoRa oraz pozostały czas pracy urządzenia  $t_v$ .

Funkcja określająca potencjał węzła  $v$  do działania w trybie relay jest dana następującym wzorem:

$$f(v) = \frac{E_v^+ \times 2^{12-SF_{vgv}}}{t_v} \quad (6.2)$$

Za pomocą funkcji  $f$  (6.2) możliwe jest przypisanie węzłowi końcowemu sieci pozycji w rankingu, zgodnie z ustalonymi kryteriami oceny węzła do działania w trybie relay. Im wyższa wartość funkcji  $f$  (6.2), tym większy potencjał węzła do działania w trybie relay. Węzły z największym potencjałem do działania w trybie relay posiadają niski współczynnik SF w komunikacji z punktem dostępowym LoRa oraz wysoką wartość nadwyżki energii. Wartość  $E_v^+$  nie jest wystarczająca do podjęcia decyzji, który węzeł powinien zostać wybrany do działania w trybie relay. Aby rozróżnić węzły o równych wartościach  $E_v^+$  i wybrać te najbardziej atrakcyjne, rozważono dwa inne kluczowe parametry: współczynnik SF w komunikacji pomiędzy urządzeniem końcowym a punktem dostępowym i pozostały czas operacyjny urządzenia.

Drugi składnik równania 6.2 tj.  $2^{12-SF_{vgv}}$  służy do wyrażenia zachowania czasu trwania transmisji symbolu, obliczonego dla różnych wartości SF (zwiększenie SF o jeden skutkuje dwukrotnym zwiększeniem czasu transmisji pojedynczego symbolu [121]). Pozostały czas pracy węzła to ostatni składnik potrzebny do określenia, który z węzłów o tej samej nadwyżce energii i współczynniku rozpraszania SF wykazuje większy potencjał do działania w trybie relay.

Funkcja  $f$  (6.2) przypisuje duże wartości węzłom z akceptowalnym krótkim pozostałym czasem działania  $t_v$ , niskim współczynnikiem SF do bramy  $SF_{vgv}$  oraz dużą nadwyżką energii  $E_v^+$ . Konieczne jest ustalenie progu  $t_{min}$  pozostałego czasu działania, poniżej którego węzły nie będą uwzględniane w wyborze węzłów relay. Jeśli dwa urządzenia skonfigurowane są do działania z taką samą wartością współczynnika SF w komunikacji z punktem dostępowym i mają podobny poziom nadwyżki energii, ale różnią się pozostałym czasem działania, wówczas do działania w trybie relay wybierane jest urządzenie z mniejszym pozostałym czasem działania (tabela 6.1  $v_1, v_2$ ).

Takie podejście zapewnia efektywne wykorzystanie zasobów energetycznych i oszczędza baterie z większym poziomem energii (z dłuższym pozostałym czasem działania) na wykorzystanie w przyszłości. To podejście minimalizuje również ryzyko wystąpienia braku urządzeń możliwych do działania w trybie relay.

Dla węzłów, które posiadają jednakową wartość współczynnika rozpraszania  $SF_{vgv}$  oraz, podczas gdy nadwyżka energii  $E_v^+$  równa jest wartości pozostałego czasu działania  $t_v$ , funkcja  $f$  (6.2) przyjmuje takie same wartości dla tych węzłów (tabela 6.1  $v_3, v_4$ ). W tym przypadku pod uwagę brany jest pozostały czas działania  $t_v$ ; im krótszy pozostały czas działania, który jest powyżej ustalonego progu  $t_{min}$ , tym lepszy węzeł do działania w trybie relay. Po upływie pozostałego czasu działania, urządzenie zostanie zdemonstrowane, a jego nadmiar energii zostanie zmarnowany. Preferowanie urządzeń z krótkim, ale akceptowalnym czasem działania i dużą nadwyżką energii pozwala

na efektywne wykorzystanie zasobów energetycznych.

## 6.2 Algorytm zachłanny

Algorytm wyboru lokalizacji węzłów relay w sieci LoRa został zaprojektowany z myślą o cyklicznym uruchamianiu w celu okresowej rekonfiguracji sieci w odpowiedzi na pogorszone warunki propagacji sygnału radiowego. Mechanizm ten służy do monitorowania i aktualizacji bieżącego zestawu lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa w odpowiedzi na pogorszone warunki transmisji w czasie działania sieci. W niniejszych rozważaniach posługuję się notacją zdefiniowaną w podrozdziale 2.4. Bieżący stan mechanizmu reprezentowany jest przez następujące zmienne:

- Graf  $G = (V, E)$  (opisany w podrozdziale 2.12) reprezentujący topologię sieci, pozostaje niezmienny.
- Graf  $G_J = (V_J, E_J) \subset G$  reprezentujący bieżący zestaw węzłów relay wraz z ich przyporządkowaniem do węzłów wymagających obsługi ze względu na ograniczoną bezpośrednią łączność z punktem dostępowym. Graf  $G_J = (V_J, E_J)$  spełnia następujące warunki:
  - $V_J = U \cup \mathcal{R}$ , gdzie  $U$  – zbiór węzłów o ograniczonej łączności z siecią obsługiwanych przez przyporządkowane im węzły realy ze zbioru  $\mathcal{R}$ ;
  - $E_J = \{(u, r) : u \in U \wedge r \in \mathcal{R}\} \subset E$ . Krawędzie w grafie  $G_J$  występują wyłącznie pomiędzy węzłami wskazanymi do działania w trybie relay i pokrytymi przez nie węzłami o ograniczonej łączności z punktem dostępowym.
  - $G_J = \emptyset \iff U = \emptyset$ . Graf  $G_J$  może być grafem pustym.
- Zbiór  $W$  węzłów o ograniczonej łączności z siecią, którym należy przyporządkować węzły relay (jak opisano w podrozdziale o urządzeniach sieci 2.4.1). Zbiór  $W$  może być zbiorem pustym.
- $t^*$ , który jest kolejnym okresem czasu, w którym sieć będzie działać w konfiguracji wskazanej przez wynik algorytmu tj. z zestawem lokalizacji węzłów relay oraz ich przyporządkowaniem do węzłów o ograniczonej łączności z siecią, wskazanymi w bieżącym przebiegu algorytmu, zanim nastąpi kolejne uruchomienie tego mechanizmu.

### 6.2.1 Mechanizm weryfikacji bieżącego przyporządkowania

W pierwszym kroku należy ustalić czy którykolwiek z węzłów działających w trybie relay jest niezdolny do pełnienia swojej roli w nadchodzącym okresie

czasu  $t^*$ . Realizowane jest to poprzez wywołanie procedury **Algorytm 3**, która zwraca zbiór węzłów typu relay, które należy wyłączyć z działania w tym trybie  $R_{off} \subset \mathcal{R}$  oraz węzły o ograniczonej łączności z siecią, które wymagają ponownego przyporządkowania nowych węzłów typu relay  $W_{add}$ .

---

**Algorytm 3** Algorytm zwraca zbiór węzłów relay, które nie posiadają wystarczających zasobów energii do kontynuacji pracy w tym trybie w nadchodzącym okresie czasu  $t^*$ . Zwracane są także te węzły o ograniczonej łączności z siecią, którym należy przyporządkować nowe węzły relay, ze względu na konieczność wyjścia z pracy w trybie relay węzłów dotychczas im przyporządkowanych.

---

- 1: **function** RELAYS\_TO\_SWITCH\_OFF( $G_J = (V_J, E_J)$ ,  $E_{max}$ ,  $t^*$ )
  - 2:      $R_{off} \leftarrow \emptyset$      $W_{add} \leftarrow \emptyset$                                       $\triangleright$  inicjalizacja zbiorów zawierających węzły relay wskazane do wyjścia z trybu relay oraz węzłów o ograniczonej łączności z siecią, którym należy przyporządkować nowe węzły relay, odpowiednio.
  - 3:     **for all**  $r \in \mathcal{R}$  **do**    $\triangleright \mathcal{R} \subset V_J$
  - 4:          $E_r = \frac{b_r}{E_{max}}$      $\triangleright E_r$  – nadwyżka energii węzła  $r$  wyrażona w liczbie dni
  - 5:          $E_r^{t^*} = E_r - (1 + \deg_{G_J}(r))t^*$                       $\triangleright$  Poziom energii węzła relay wyrażony w liczbie dni po upływie czasu  $t^*$
  - 6:         **if**  $E_r^{t^*} < t_r - t^*$  **then**                      $\triangleright$  Jeśli po upływie czasu  $t^*$ , relay  $r$  nie będzie dysponował poziomem energii na co najmniej  $t_r - t^*$  dni
  - 7:              $R_{off} \leftarrow R_{off} \cup \{r\}$
  - 8:              $W_{add} \leftarrow W_{add} \cup N_{G_J}(r)$
  - 9:     **return**  $R_{off}, W_{add}$
- 

**Przykład 3 (Przykład działania Algorytmu 3)** Załóżmy, że w danym momencie węzeł relay  $r$  obsługuje  $n = 2$  węzły o ograniczonej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym, posiada poziom baterii  $b_r = 200$  [mAs] i pozostały czas działania  $t_r = 50$  dni. Rozważamy okres  $t^* = 5$  dni z maksymalnym poziomem energii dla transmisji  $E_{max} = 2$  [mAs].

W pierwszej kolejności rozważamy nadwyżkę pozostałej energii wyrażonej w liczbie dni:  $E_v = \frac{b_r}{E_{max}} = \frac{200}{2} = 100$ . Urządzenie  $r$  posiada wystarczający poziom baterii na kolejne 100 dni. Następnie rozważamy poziom energii po upływie czasu  $t^*$ ;  $E_v^{t^*} = E_v - (1 + n)t^* = 100 - (1 + 2) \times 5 = 85$ . Kiedy bieżące pięciodniowe okno czasowe się kończy, po odjęciu wymagań energetycznych potrzebnych w tym okresie dla samego węzła relay oraz obsługiwanych przez niego węzłów o ograniczonej łączności z siecią, pozostanie poziom baterii wystarczający na ponad osiemdziesiąt dni. Rozważając, że urządzenie  $r$  potrzebuje energii na kolejne  $t_v - t^* = 45$  dni, a z obliczeń wynika, że wystarczy mu na 85 dni, można potwierdzić, że urządzenie może działać jako węzeł relay



dla  $n$  węzłów o ograniczonej łączności z siecią, które obsługuje przez kolejne  $t^*$  dni.

### 6.2.2 Graf potencjalnych węzłów pośredniczących

Kolejnym krokiem algorytmu jest wyznaczenie zbioru potencjalnych węzłów relay  $\mathcal{P}^*$  oraz stworzenie ważonego grafu dwudzielnego łączącego potencjalne węzły relay z sąsiadującymi z nimi węzłami o ograniczonej łączności z siecią. Zbiór potencjalnych węzłów relay jest zdefiniowany następująco:

$$\mathcal{P}^* = \{v \in V \setminus \mathcal{V}^* : E_v^+ > 0 \wedge N_G(v) \cap \mathcal{W}^* \neq \emptyset\}, \quad (6.3)$$

gdzie  $V$  – zbiór wierzchołków w grafie  $G = (V, E)$  2.12. Zbiór  $\mathcal{W}^* = W \cup \mathcal{W}_{add}$  zawiera węzły wymagające przyporządkowania węzłów relay, w szczególności węzły o ograniczonej łączności z siecią  $W$  oraz zbiór  $\mathcal{W}_{add}$  węzłów o ograniczonej łączności z siecią stanowiące wynik metody 3, którym należy przyporządkować nowe węzły pośredniczące, gdyż dotychczas obsługujące je węzły relay nie mogą już pełnić tej funkcji. Zbiór pozostałych węzłów sieci  $\mathcal{V}^* = V_J \cup R_{off} \cup \mathcal{W}^*$ .

Graf potencjalnych węzłów pośredniczących jest zdefiniowany jako

$$\mathcal{G}_H = (\mathcal{V}_H, \mathcal{E}_H, \Omega). \quad (6.4)$$

Jego zbiór wierzchołków  $\mathcal{V}_H = \mathcal{W}^* \cup \mathcal{P}^*$  jest sumą zbiorów: potencjalnych węzłów relay ( $\mathcal{P}^*$ ) i węzłów wymagających przyporządkowania węzłów relay ( $\mathcal{W}^*$ ). Pomiedzy węzłami  $w \in \mathcal{W}^*$  oraz  $v \in \mathcal{P}^*$  występuje krawędź  $(w, v) \in \mathcal{E}_H$  w grafie  $\mathcal{G}_H$  wtedy i tylko wtedy, gdy węzły te są sąsiadującymi wierzchołkami w grafie  $G = (V, E)$ .

$$\mathcal{E}_H = \{(w, v) \mid w \in \mathcal{W}^* \wedge v \in \mathcal{P}^* \wedge v \in N_G(w)\}, \quad (6.5)$$

gdzie  $N_G(w)$  oznacza zbiór sąsiednich wierzchołków wierzchołka  $w \in V$  w grafie  $G = (V, E)$  (jak zdefiniowano w podrozdziale 2.4.3). Innymi słowy, zbiór krawędzi  $\mathcal{E}_H$  grafu  $\mathcal{G}_H$  zawiera połączenia wyłącznie pomiędzy potencjalnymi węzłami relay a węzłami wymagającymi przyporządkowania węzłów relay.

Waga  $\Omega_{wv}$  krawędzi  $(w, v) \in \mathcal{E}_H$  wyznaczana jest w następujący sposób:

$$\Omega_{wv} = E_{wv}^* \quad (6.6)$$

gdzie  $E_{wv}^*$  to poziom dziennego zużycia energii (mAs), które uwzględnia zużycie energii przez węzeł pośredniczący na nasłuch oraz transmisję danych od węzła  $w \in \mathcal{W}^*$  do punktu dostępowego. Koszt ten wyznaczony zostaje dla wszystkich krawędzi incydentnych z węzłem  $v \in \mathcal{P}^*$  w grafie  $\mathcal{G}_H$ .

### 6.2.3 Wybór lokalizacji węzłów pośredniczących

Ostatnim krokiem algorytmu jest wybór lokalizacji węzłów do działania w trybie relay wraz z identyfikacją obszaru ich działania, zapewniając pokrycie dla węzłów o ograniczonej łączności z siecią (należących do zbioru  $\mathcal{W}^*$ ) – aktualizacja grafu  $G_J = (V_J, E_J)$ , reprezentującego bieżące przyporządkowanie pomiędzy węzłami o ograniczonej łączności a węzłami relay.

Przy założeniu, że graf  $G_J = (E_J, V_J)$  jest pusty, definicję problemu wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa można sformułować w następujący sposób:

**Problem 2 (Wybór lokalizacji węzłów pośredniczących z ograniczeniami)**

*Dla grafu  $\mathcal{G}_H = (\mathcal{V}_H, \mathcal{E}_H, \Omega) \subset G$  i zbioru węzłów  $\mathcal{W}^* \subset V$ , wymagających przyporządkowania węzłów relay należy znaleźć zbiór węzłów relay  $\mathcal{R}$  oraz graf  $G_J = (V_J, E_J)$ , taki że  $G_J \subset \mathcal{G}_H$ , spełnia następujące warunki*

1.  $V_J = \mathcal{W}^* \cup \mathcal{R}$
2.  $E_J = \{(u, r) : u \in \mathcal{W}^* \wedge r \in \mathcal{R} \wedge r \in N_{\mathcal{G}_H}(u)\}$
3.  $\forall u \in \mathcal{W}^* \deg_{G_J}(u) = 1$
4.  $\forall r \in \mathcal{R} \deg_{G_J}(r) \geq 1$
5. *suma wag krawędzi incydentnych z węzłem relay  $r \in \mathcal{R}$  jest mniejsza bądź równa wartości jego nadwyżki energii  $E_r^+$ ,*

$$\sum_{r \in \mathcal{R}, (u,r) \in E_J} \Omega_{ur} \leq E_r^+.$$

Spełnienie ograniczenia sformułowanego w punkcie 5. w opisie problemu 2 w pewnym sensie realizuje minimalizację liczby węzłów wybranych do działania w trybie relay.

$$\min \sum_{v \in V} x_v,$$

gdzie  $x_v \in \{0, 1\}$  i  $x_v = 0 \iff v \notin \mathcal{R}$ ,  $x_v = 1 \iff v \in \mathcal{R}$ .

Rozwiązanie problemu sformułowanego w **Problem 2** jest realizowane przez algorytm 4. Kolejność iteracji po elementach zbioru potencjalnych węzłów relay  $\mathcal{P}^*$  oraz węzłów o ograniczonej łączności z siecią, którym należy przyporządkować węzły relay jest definiowana przez następujące funkcje wyboru:

$$r_{select}(\mathcal{P}^*) = \arg \max_{v \in \mathcal{P}^*} f(v), \quad (6.7)$$

gdzie funkcję  $f$  zdefiniowano w 6.2.

$$w_{select}(\mathcal{T}, \Omega, r) = \arg \min_{v \in \mathcal{T}} \Omega_{vr} \quad (6.8)$$

Algorytm działa w sposób iteracyjny, wybierając najlepsze możliwe rozwiązanie w danym momencie, nie wracając do wcześniejszych decyzji, co jest charakterystyczne dla podejścia zachłannego. Algorytm w zewnętrznej pętli iteruje po węzłach  $r \in \mathcal{P}^*$ , a w wewnętrznej pętli po sąsiednich węzłach  $w \in N_{\mathcal{G}_H}(r)$  węzła  $r$ , wymagających przyporządkowania węzłów relay. Identyfikacja obszaru działania węzła sieci wskazanego do pracy w trybie relay za pomocą funkcji wyboru 6.7 polega na przypisaniu sąsiednich (w grafie  $\mathcal{G}_H$ ) niepokrytych węzłów o ograniczonej łączności z siecią według kolejności uwzględniającej pierwszeństwo przypisania węzłów z najmniejszym wymaganiem kosztem energetycznym związanym z ich obsługą. Taka strategia identyfikacji obszaru działania węzła pośredniczącego zapewnia minimalizację zużycia energii w sieci oraz efektywne wykorzystanie zasobów poprzez zagospodarowanie nadwyżki energii węzła relay dla maksymalnej liczby węzłów o możliwie najniższym koszcie energetycznym związanym z ich obsługą przez dany węzeł relay. Pseudokod algorytmu 5 przedstawia opcjonalną pro-

---

**Algorytm 4** Algorytm wyboru lokalizacji węzłów relay w sieci LoRa. Zwraca zaktualizowany graf  $G_J = (V_J, E_J)$  opisujący wynikowy wybór węzłów relay wraz z ich przyporządkowaniem do węzłów o ograniczonej łączności z siecią.

---

```

1: function ASSIGN_RELAYS( $\mathcal{W}^*, \mathcal{P}^*, G_J = (V_J, E_J), \mathcal{G}_H = (\mathcal{V}_H, \mathcal{E}_H, \Omega),$ 
    $r_{\text{select}}(\cdot), w_{\text{select}}(\cdot)$ )
2:   for  $r \leftarrow r_{\text{select}}(\mathcal{P}^*)$  do
3:      $\mathcal{T} \leftarrow \mathcal{N}_{\mathcal{G}_H}(r)$ 
4:      $\mathcal{S} \leftarrow \emptyset$ 
5:     for  $w \leftarrow w_{\text{select}}(\mathcal{T}, \Omega, r)$  do
6:       if  $\sum_{v \in \mathcal{S} \cup \{w\}} \Omega_{vr} \leq E_r^+$  then  $\triangleright$  sprawdzenie czy węzeł  $r$  może
           pełnić rolę węzła relay dla węzła  $w$ 
7:          $U \leftarrow U \cup \{w\}$   $\triangleright$  dodanie  $w$  do zbioru wierzchołków grafu
           wynikowego  $U \subset V_J$ 
8:          $E_J \leftarrow E_J \cup \{(w, r)\}$ 
9:          $\mathcal{W}^* \leftarrow \mathcal{W}^* \setminus \{w\}$   $\triangleright$  usunięcie węzła  $w$  ze zbioru
           niepokrytych węzłów o ograniczonej łączności z siecią
10:         $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} \cup \{w\}$   $\triangleright$  dodanie węzła  $w$  do zbioru węzłów
           przypisanych do obsługi przez relay  $r$ 
11:       if  $\mathcal{S} \neq \emptyset$  then
12:          $\mathcal{R} \leftarrow \mathcal{R} \cup \{r\}$ 
13:   return  $G_J = (V_J, E_J)$   $\triangleright$  Zwrócenie grafu wynikowego

```

---

cedurę poprawy rozwiązania uzyskanego przez algorytm 4 wyboru lokalizacji węzłów relay. Procedurę 5 stosuje się w przypadku, jeśli w graf potencjalnych węzłów relay  $\mathcal{G}_H = (\mathcal{V}_H, \mathcal{E}_H, \Omega)$  stanowiący dane wejściowe dla algorytmu 4 został poddany procesowi filtracji, w wyniku którego pozostawiono jedynie krawędzie w grafie, charakteryzujące się współczynnikiem SF=7.

---

**Algorytm 5** Algorytm opcjonalnej poprawy wyniku algorytmu zachłannego 4 poprzez realizację ponownego przypisania dla niektórych węzłów ze zbioru  $U$ . Zwraca zaktualizowany graf  $G_J = (V_J, E_J)$ .

---

```

1: function POST-PROCESSING( $G_J = (V_J, E_J)$ ,  $G = (V, E)$ )
2:    $SF_{min} = \min_{r \in R} (SF_{rg_r})$ 
3:    $R_{SF_{min}} = \{r \in R : SF_{rg_r} > SF_{min}\}$ 
4:   sortowanie malejąco  $R_{SF_{min}}$  według  $SF_{rg_r}$ ,  $\deg_{G_J}(r)$ 
5:   for  $r \in R_{SF_{min}}$  do
6:     for  $w \in N_{G_J}(r)$  do
7:        $r_r = \text{REASSIGN\_WEAK\_NODE}(w, G_J, G)$ 
8:        $E_J \leftarrow E_J \cup \{(w, r_r)\}$ 
9:        $E_J \leftarrow E_J \setminus \{(w, r_r)\}$ 
10:      if  $\deg_{G_J}(r) = 0$  then
11:         $R \leftarrow R \setminus \{r\}$ 
12:   return  $G_J = (V_J, E_J)$ 

```

---

**Algorytm 6** Procedura zwraca węzeł relay (jeśli taki istnieje), do którego przypisanie węzła  $w \in \mathcal{W}^*$  jest bardziej korzystne niż w bieżącym rozwiązaniu  $G_J = (V_J, E_J)$ .

---

```

1: function REASSIGN_WEAK_NODE( $w, G_J = (V_J, E_J)$ ,  $G = (V, E)$ )
2:   for  $s \in \{SF_{start}, \dots, SF_{end}\}$  do  $\triangleright$  dla wybranego zakresu wartości SF
3:      $R_s \leftarrow \{r \in R : SF_{wr} = s\}$ 
4:     sortowanie rosnąco  $R_s$  według  $SF_{rg_r}$ 
5:     for  $r_r \in R_s$  do
6:       if  $\Omega_{wr_r} \leq E_{r_r}^+$  then
7:          $E_{r_r}^+ = E_r^+ - \Omega_{wr_r}$ 
8:       return  $r_r$ 

```

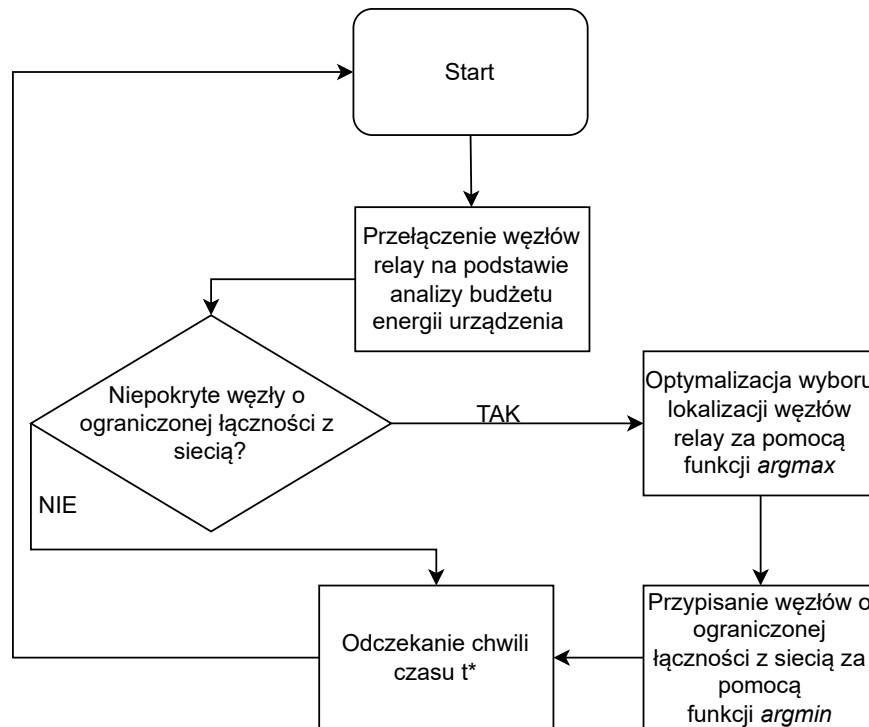
---

### 6.2.4 Złożoność obliczeniowa

Do określenia pesymistycznego czasu działania zaproponowanego algorytmu wyboru lokalizacji węzłów relay posłużono się notacją asymptotyczną  $\mathcal{O}$  [119]. Pesymistyczny czas wykonania algorytmu zachłannego osiągnany jest w przypadku, gdy graf  $G = (V, E)$  (2.12) jest pełny.

Algorytm zachłanny wyboru lokalizacji węzłów relay obejmuje kilka kluczowych etapów działania.

1. Etap 1: Weryfikacja reprezentowanego przez graf  $G_J = (V_J, E_J)$  bieżącego przyporządkowania węzłów relay za pomocą algorytmu 3.
  - Dane wejściowe: Graf reprezentujący bieżące przyporządkowanie węzłów relay  $G_J = (V_J, E_J)$ .
  - Dane wyjściowe: zbiór węzłów relay, które należy wyłączyć z działania w trybie relay  $R_{off}$  oraz zbiór węzłów  $W_{add}$ , którym ponownie



Rysunek 6.1: Schemat blokowy algorytmu (obejmującego algorytmy 3, 4) wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa.

trzeba przyporządkować węzły relay.

Czas działania tej procedury wynosi  $\mathcal{O}(E_J)$ , ze względu na operację analizy sąsiedztwa każdego węzła relay  $r \in R$ , a więc wszystkich krawędzi w grafie  $G_J = (V_J, E_J)$ .

2. Etap 2: Utworzenie grafu potencjalnych węzłów relay – struktury danych, która posłuży jako podstawa dla kolejnego etapu algorytmu.
  - Dane wejściowe: Graf reprezentujący topologię sieci  $G = (V, E)$  2.12.
  - Dane wyjściowe: graf potencjalnych węzłów relay  $\mathcal{G}_H = (\mathcal{V}_H, \mathcal{E}_H, \Omega) \subset G = (V, E)$ .

Jeżeli każdy wierzchołek w grafie wejściowym  $G = (V, E)$  przechowuje atrybut określający, do jakiego podzbioru wierzchołków należy, algorytm może bezpośrednio sprawdzać, czy dany wierzchołek należy do zbioru  $\mathcal{W}^*$  podczas iteracji przez wszystkie wierzchołki ( $\mathcal{O}(V)$ ). Jeśli dany wierzchołek należy do zbioru  $\mathcal{W}^*$ , wówczas sprawdzane jest jego sąsiedztwo ( $\mathcal{O}(\mathcal{W}^*V)$ ). W takim przypadku czas działania algorytmu

wynosi  $\mathcal{O}(V + \mathcal{W}^*V)$ . Jeśli natomiast zbiór  $\mathcal{W}^*$  reprezentowany jest oddzielnie, nie jest konieczne przeglądanie całego grafu w celu identyfikacji wierzchołków należących do zbioru  $\mathcal{W}^*$ . Zamiast tego, proces analizy koncentruje się wyłącznie na wyselekcjonowanych wierzchołkach, które są z góry określone jako należące do zbioru  $\mathcal{W}^*$ . Dostęp do informacji o tych wierzchołkach pozwala bezpośrednio uzyskać ich sąsiedztwo, eliminując potrzebę iteracji przez całą strukturę grafu, co prowadzi do złożoności  $\mathcal{O}(\mathcal{W}^*V)$ .

### 3. Etap 3: Wykonanie algorytmu 4.

- Dane wejściowe: zbiór  $\mathcal{W}^*$ , zbiór  $\mathcal{P}^*$ , graf potencjalnych węzłów relay  $\mathcal{G}_H = (V_H, E_H, \Omega)$ , graf  $G_J = (V_J, E_J)$ .
- Dane wyjściowe: zaktualizowany graf  $G_J = (V_J, E_J)$ .

W tabeli 6.2 przedstawiono czas  $c_i$  oraz krotność wykonania każdej instrukcji spośród tych o największym wpływie na złożoność czasową algorytmu 4. Niech  $n_1 = |\mathcal{W}^*|$ ,  $n_2 = |\mathcal{P}^*|$ .

Tablica 6.2: Koszt i krotność wykonania instrukcji istotnych w kontekście złożoności obliczeniowej algorytmu 4.

instrukcja	koszt i krotność
2 for $r \leftarrow r_{\text{select}}(\mathcal{P}^*)$	$c_1 \cdot \sum_{k=1}^{n_1} k$
3 $\mathcal{T} \leftarrow \mathcal{N}_{\mathcal{G}_H}(r)$	$c_2 \cdot n_1 \cdot n_1$
5 for $w \leftarrow w_{\text{select}}(\mathcal{T}, \Omega, r)$	$c_3 \cdot \sum_{k=1}^{n_1} k$
9 $\mathcal{W}^* \leftarrow \mathcal{W}^* \setminus \{w\}$	$c_4 \cdot \sum_{k=1}^{n_1} k$
usunięcie $r$ z $\mathcal{P}^*$	$c_5 \cdot \sum_{k=1}^{n_2} k$

Wówczas, pesymistyczny czas działania algorytmu 4 wynosi

$$\begin{aligned} T(n_1, n_2) &= c_1 \cdot \sum_{k=1}^{n_1} k + c_2 \cdot n_1^2 + c_3 \cdot \sum_{k=1}^{n_1} k + c_4 \cdot \sum_{k=1}^{n_1} k + c_5 \cdot \sum_{k=1}^{n_2} k = \\ &= (c_1 + c_3 + c_4) \cdot \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} + c_5 \cdot \frac{n_2(n_2 + 1)}{2} + c_2 \cdot n_1^2. \end{aligned}$$

Pomijając składniki niższego rzędu oraz stałe współczynniki, które dla dostatecznie dużych danych zostają zdominowane przez wpływ samego rozmiaru danych, pesymistyczny czas działania algorytmu 4 wynosi

$$T(n_1, n_2) = \mathcal{O}(n_1^2 + n_2^2) = \mathcal{O}(\mathcal{W}^{*2} + \mathcal{P}^{*2}) \quad (6.9)$$

Stąd, czas działania algorytmu jest sumą czasów wykonania jego najbardziej istotnych obliczeniowo procedur – budowy grafu potencjalnych węzłów relay oraz algorytmu 4:

$$\mathcal{O}(W^*V) + \mathcal{O}(W^{*2} + \mathcal{P}^{*2}). \quad (6.10)$$

## 6.3 Wyniki

W celu oceny skuteczności zaproponowanego algorytmu zachłannego wykorzystano środowisko ewaluacji efektywności metod wyboru lokalizacji węzłów relay w sieci LoRa opisane w rozdziale 4. Jako metodę referencyjną wykorzystano implementację algorytmu [32] ze względu na podobieństwo do zaproponowanego podejścia i jednocześnie dobrze znaną metodę. Przeprowadzono analizę porównawczą obydwu metod pod kątem zużycia energii w sieci działającej w konfiguracji wskazanej przez wynik metod w zróżnicowanych scenariuszach topologii sieci oraz z uwzględnieniem różnych wartości odsetka węzłów, którym należy przyporządkować węzły relay. W procesie ewaluacji zakres scenariuszy eksperymentalnych został rozszerzony (względem tych przeprowadzonych w rozdziale 5) o topologie sieci odzwierciedlające rozmieszczenie węzłów w rzeczywistych wdrożeniach IoT tj. sieci P i T opisane w podrozdziale 4.3.

Przebieg pojedynczego eksperymentu symulacyjnego polega na wykonaniu dwóch jednoczesnych i niezależnych symulacji działania sieci, oddzielnie dla obydwu konfiguracji wskazanych przez wyniki metod tj. przyporządkowanie węzłów pośredniczących przez zaproponowany algorytm zachłanny i metodę referencyjną [32] dla danej topologii sieci.

W przypadku zaproponowanego algorytmu, podczas eksperymentu symulacyjnego ma miejsce realizacja cyklu przedstawionego na schemacie blokowym 6.1. Zastosowano połączenie metody optymalizacji wyboru lokalizacji węzłów relay z symulatorem zdarzeń dyskretnych OMNeT++ iteracyjnie. Oznacza to, że zaproponowana metoda uruchamiana jest okresowo co  $t^*$  dni w trakcie symulowanego czasu operacyjnego sieci w celu monitorowania bieżącego przyporządkowania węzłów relay w sieci w oparciu o procedurę 3 uwzględniającą analizę bieżącego poziomu naładowania baterii urządzenia, o którym informacji dostarcza środowisko symulacyjne.

W przypadku metody referencyjnej [32] wybór lokalizacji węzłów relay w sieci dokonywany jest jeden raz, na początku i pozostaje niezmienny przez cały rozpatrywany okres operacyjny sieci.

Wszystkie węzły końcowe sieci rozpoczynają z pełnym naładowaniem baterii o pojemności 160 mAh, ta wartość stanowi budżet energii na transmisję pakietów danych (160 mAh = 576 000 mAs jako parametr symulacji). W trakcie postępu symulacji stan zużycia baterii urządzeń sieci zapisywany jest przez cały okres działania sieci.

Zbadano osiem różnych scenariuszy opisanych w podrozdziale 4.3. Ponieważ rozpatrywane scenariusze topologii sieci zawierają element losowości, np. losowo wskazana lokalizacji węzłów o ograniczonej łączności z siecią, którym należy przyporządkować węzły pośredniczące, w obrębie każdego scenariusza wygenerowano populację przypadków testowych o odpowiedniej liczności.

- R(1500, 3%), rozmiar populacji  $n = 1000$ ;
- R(1000, 3%), rozmiar populacji  $n = 1000$ ;
- P(2.5%), P(5%), P(7%), rozmiar populacji  $n = 100$  (dla każdego scenariusza);
- T(2.5%), T(5%), T(7%), rozmiar populacji  $n = 100$  (dla każdego scenariusza).

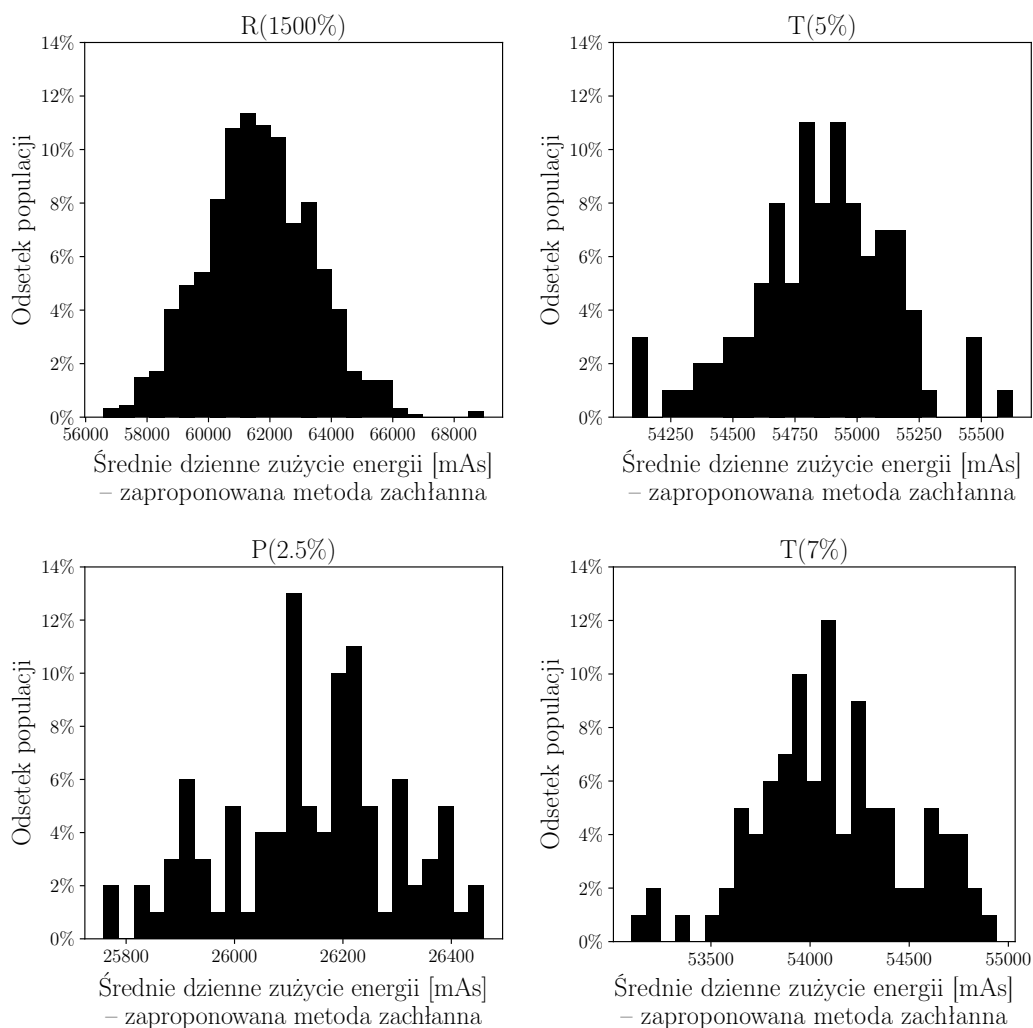
W ocenie algorytmów zachłannego oraz referencyjnego [32] posłużono się metryką efektywności algorytmów wyboru lokalizacji węzłów relay w sieci LoRa opisaną w podrozdziale 4.2. Przypomnijmy, że jest to miara poziomu zużycia energii w całej sieci w symulowanym okresie jej działania. Na podstawie wyników symulacyjnych wyznaczono średnią wartość i odchylenie standardowe dziennego poziomu zużycia energii w całej sieci, uzyskanych dla obydwu algorytmów wyboru lokalizacji węzłów relay w sieci LoRa: zaproponowanego algorytmu zachłannego oraz metody referencyjnej [32], w różnych scenariuszach topologii sieci. Średnia wartość i odchylenie standardowe zostały wyznaczone dla populacji o rozmiarach zdefiniowanych w zależności od rozpatrywanego scenariusza topologii sieci. Wyniki eksperymentów symulacyjnych zaprezentowano w tabeli 6.3. Prezentację graficzną – histogramy średniego dziennego

Tablica 6.3: Średnia wartość i odchylenie standardowe dziennego zużycia energii (mAs) w sieci dla zaproponowanego algorytmu zachłannego oraz algorytmu referencyjnego ([32]) w różnych scenariuszach testowych.

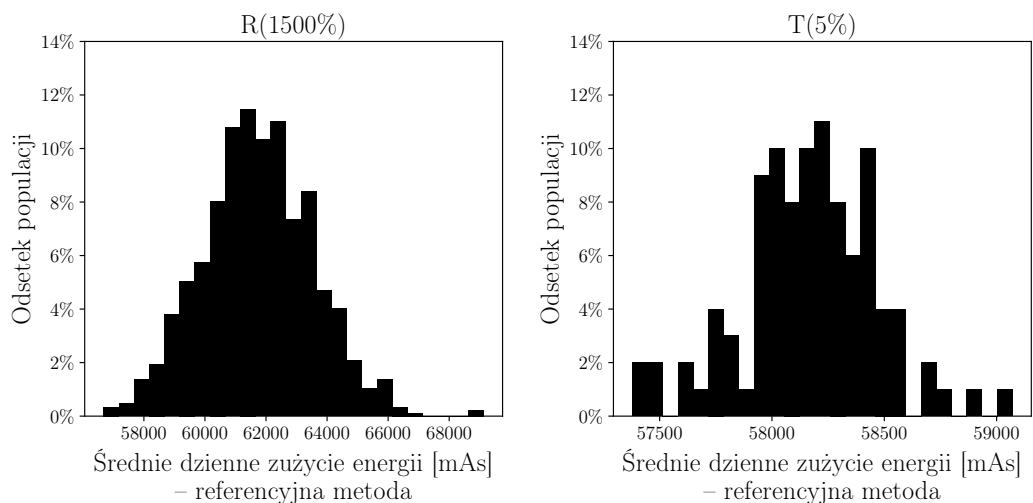
Scenariusz testowy	Algorytm zachłanny	Algorytm referencyjny [32]	Różnica
R(1000, 3%)	$9956.1 \pm 2496.6$	$10045.4 \pm 2496.9$	$89.3 \pm 3.9$
R(1500, 3%)	$61634.7 \pm 1801.7$	$61744.9 \pm 1800.8$	$110.3 \pm 25.2$
P(2.5%)	$26136.6 \pm 157.8$	$26252.7 \pm 159.1$	$116.1 \pm 7.8$
P(5%)	$25890.3 \pm 288.3$	$26138.3 \pm 289.6$	$248.0 \pm 9.4$
P(7%)	$25671.6 \pm 276.1$	$26028.1 \pm 276.9$	$356.5 \pm 10$
T(2.5%)	$55859 \pm 234.4$	$57481.3 \pm 236.4$	$1622.3 \pm 30$
T(5%)	$54855.5 \pm 302.2$	$58167.6 \pm 313.5$	$3312.1 \pm 51.1$
T(7%)	$54103.5 \pm 384.3$	$58785.3 \pm 388.8$	$4681.7 \pm 57.1$

poziomu zużycia energii w sieci osiąganego metodami zachłanną oraz referencyjną [32] przedstawiono na rysunkach 6.2 i 6.3, odpowiednio.

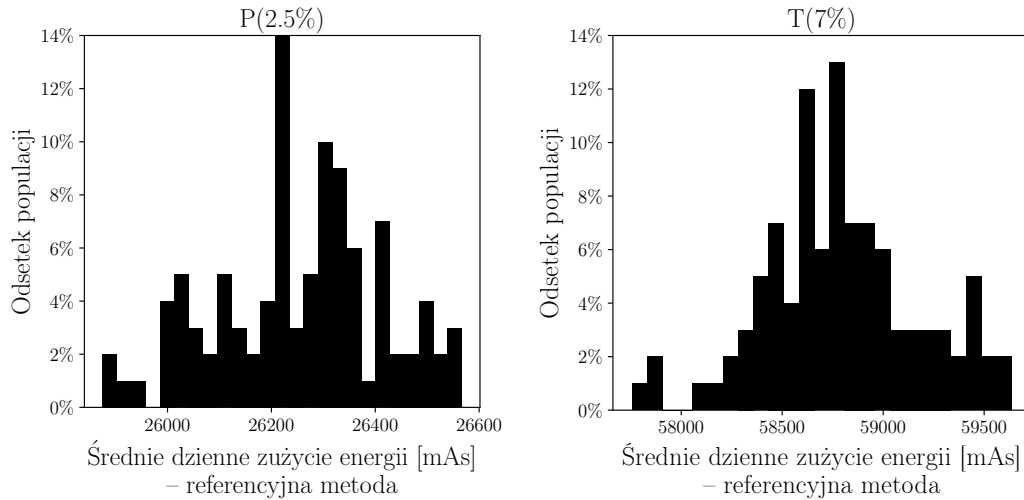




Rysunek 6.2: Histogramy średniego dziennego zużycia energii osiąganego zaproponowanym algorytmem zachłannym w wybranych scenariuszach testowych.



Rysunek 6.3: Histogramy porównawcze średniego dziennego zużycia energii dla algorytmu referencyjnego [32].



Rysunek 6.3: Histogramy porównawcze średniego dziennego zużycia energii dla algorytmu referencyjnego [32] – kontynuacja rysunku.

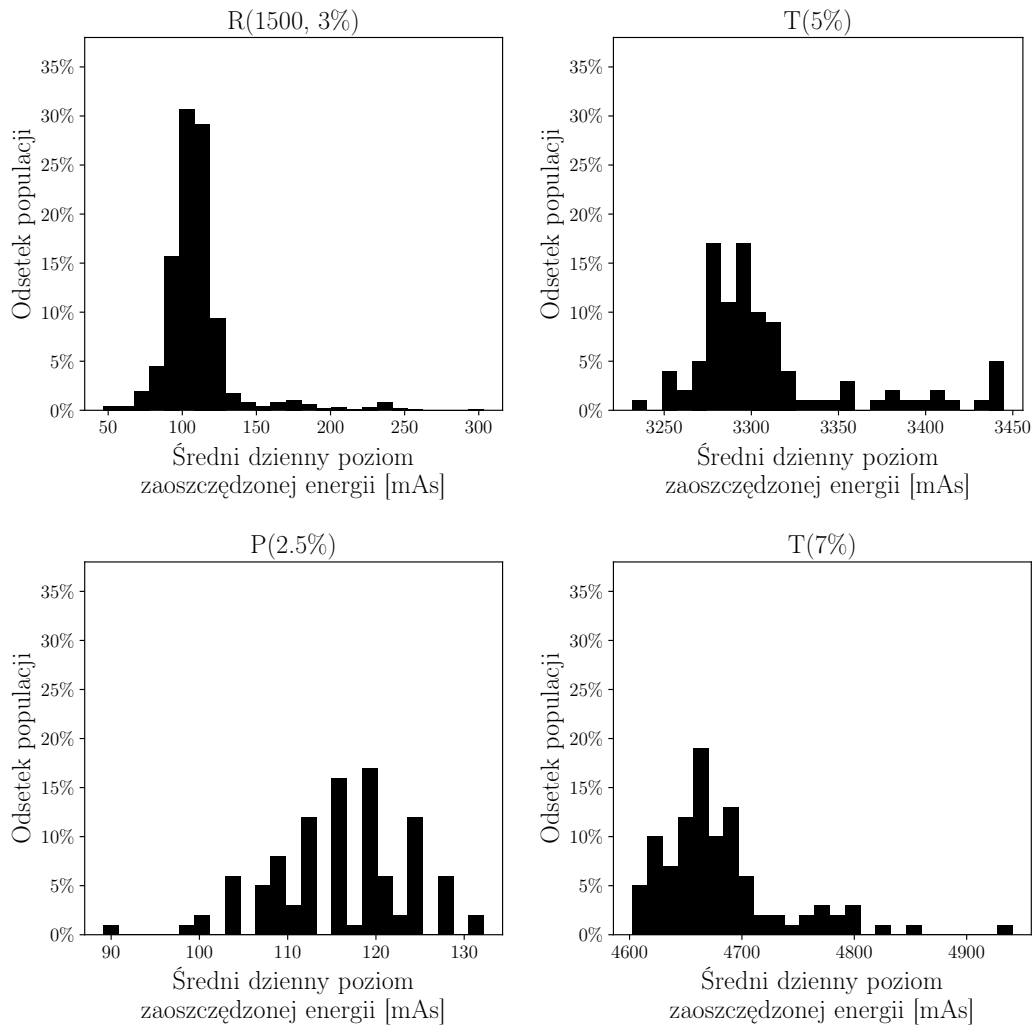
Informacje przedstawione na histogramach z rysunków 6.2 i 6.3 pochodzą z symulacji i można je wykorzystać do sprawdzenia prawdopodobieństwa większego lub mniejszego zużycia energii w sieci.

Wykresy rozproszenia dla poszczególnych przebiegów symulacji dla czterech wybranych scenariuszy testowych przedstawiono na rysunku 6.5 (wykresy dla pozostałych scenariuszy mają podobny charakter).

W tabeli 6.4 zaprezentowano różnicę procentową w zużyciu energii w sieci osiągniętym przez zaproponowany algorytm zachłanny i referencyjny [32]. Wyniki wskazują na obiecującą skuteczność proponowanej metody, ponieważ ma ona mniejsze zapotrzebowanie na energię. Szczególnie widoczne jest to dla topologii rzeczywistych wdrożeń IoT.

W każdym przypadku zaproponowana metoda zachłanna osiąga lepsze wyniki, co dodatkowo potwierdzono jako istotne statystycznie (używając testu Wilcoxona [122], wartość  $p < 0.01$ ). Sieć działająca w konfiguracji wskazanej przez zaproponowaną metodę zachłanną charakteryzuje się mniejszym zużyciem energii niż w przypadku metody referencyjnej [32]. Indywidualne różnice pomiędzy poziomami zużycia energii to średnia dzienna ilość zaoszczędzonej energii osiągnięta proponowaną metodą zachłanną (przedstawione w formie histogramów na rysunku 6.4).

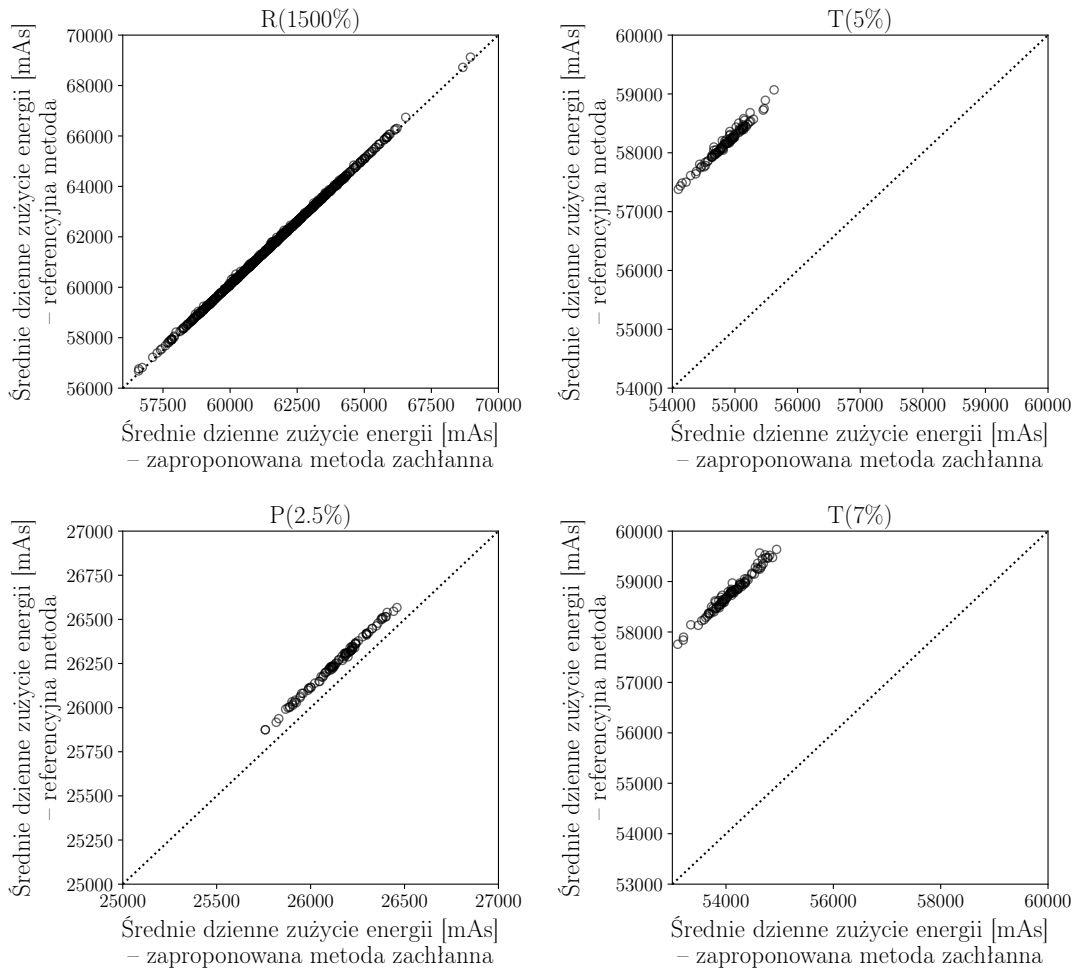
Mniejszy poziom zużycia energii w sieci osiągany przez zaproponowany algorytm zachłanny jest spowodowany m.in. mniejszą liczbą węzłów (w porównaniu z metodą referencyjną) wybieranych do działania w trybie relay. Zaproponowana metoda zachłanna dąży do ograniczenia liczby węzłów wybranych do działania w trybie relay poprzez przyporządkowanie jednemu węzłowi pośredniczącemu wielu węzłów o ograniczonej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym. Przydział węzłów o ograniczonej łączności z siecią dla danego węzła pośredniczącego realizowany jest na podstawie zapasu ener-



Rysunek 6.4: Histogramy średniej wartości dziennego poziomu zaoszczędzonej energii osiągananej proponowaną metodą zachłanną dla wybranych scenariuszy testowych – kontynuacja rysunku.

gii jaki posiada ten węzeł oraz przy uwzględnieniu kosztu energii związanego z zapewnieniem utrzymania łączności, co pozwala na zachowanie ograniczeń związanych ze zużyciem energii urządzenia zasilanego baterią. Z kolei metoda referencyjna przyporządkowuje jednemu węzłowi pośredniczącemu dokładnie jeden węzeł o ograniczonej łączności z siecią. Przekłada się to na wyższy koszt energetyczny związany z przełączeniem urządzeń do działania w trybie relay dla metody referencyjnej [32], gdyż w rozważanych scenariuszach eksperymentów metoda ta wybiera średnio około 3 razy więcej węzłów do działania w trybie relay niż zaproponowane podejście (tabela 6.5).

Poziom zaoszczędzonej energii osiągnięty przez proponowany algorytm zachłanny zmienia się w zależności od przyjętego scenariusza testowego, co jest spowodowane charakterystyką danej topologii sieci. Rozważane topologie sieci



Rysunek 6.5: Wykresy rozproszenia średniego dziennego zużycia energii w wybranych scenariuszach testowych. Każdy wykres przedstawia wynik dla jednego scenariusza. Każdy punkt na wykresie opisany jest parą wartości: kosztem (średnie dzienne zużycie energii (mAs)) dla proponowanej metody i metody referencyjnej [32].

różnią się pod względem średniej wartości współczynnika rozpraszania SF w komunikacji pomiędzy urządzeniem końcowym a punktem dostępowym, który ma znaczący wpływ poziom zużycia energii, jak opisano w podrozdziale 2.1.

W przypadku topologii sieci rzeczywistych wdrożeń IoT P i T średnia wartość współczynnika SF w komunikacji pomiędzy urządzeniem końcowym a punktem dostępowym dla topologii sieci P wynosi 7.8 z odchyleniem standardowym 1.5, podczas gdy dla sieci T jest to wartość nieco bardziej pesymistyczna, ponieważ wynosi 9.2 z odchyleniem standardowym 1.7. Statystyki pozycyjne dotyczące wartości współczynnika SF w komunikacji pomiędzy węzłem końcowym a punktem dostępowym przedstawiono w tabeli 6.6. Stąd, w przypadku topologii sieci T na jeden węzeł wymagający przyporządkowania

Tablica 6.4: Średnia wartość i odchylenie standardowe poziomu zaoszczędzonej energii (%) w sieci osiągniętego zaproponowaną metodą zachłanną w różnych scenariuszach testowych.

Scenariusz testowy	Średnia wartość i odchylenie standardowe odsetka zaoszczędzonej energii w sieci.
R(1000, 3%)	0.95% ± 0.23%
R(1500, 3%)	0.19% ± 0.06%
P(2.5%)	0.44% ± 0.03%
P(5%)	0.95% ± 0.04%
P(7%)	1.37% ± 0.04%
T(2.5%)	2.82% ± 0.05%
T(5%)	5.69% ± 0.08%
T(7%)	7.96% ± 0.1%

Tablica 6.5: Średnia wartość i odchylenie standardowe stosunku liczby węzłów relay wybieranych przez metodę referencyjną [32] do liczby węzłów relay wybieranych przez zaproponowany algorytm zachłanny w różnych scenariuszach testowych.

Scenariusz testowy	Średni stosunek liczby lokalizacji węzłów relay
R(1000, 3%)	3.92 ± 0.52
R(1500, 3%)	2.49 ± 0.3
P(2.5%)	3.14 ± 0.41
P(5%)	3.53 ± 0.28
P(7%)	3.65 ± 0.23
T(2.5%)	2.72 ± 0.35
T(5%)	3.10 ± 0.25
T(7%)	3.24 ± 0.26

węzła pośredniczącego przypada mniej potencjalnych węzłów relay o relatywnie niskiej tj. korzystnej w kontekście zużycia energii wartości współczynnika SF w komunikacji do bramy niż w przypadku sieci P. W przypadku topologii sieci T w wynikowych zestawach węzłów pośredniczących wybieranych zarówno przez metodę zachłanną, jak i referencyjną występuje zwiększony odsetek węzłów relay z wyższą wartością współczynnika SF w komunikacji do bramy niż w pozostałych topologiach sieci. Jednak w przypadku algorytmu zachłannego, odsetek węzłów relay z pesymistycznym współczynnikiem SF w komunikacji do bramy jest mniejszy niż w przypadku metody referencyjnej. Wynika to ze specyfiki działania metody, m.in. z faktu przypisania jednemu

Tablica 6.6: Statystyki pozycyjne wartości współczynnika SF dla topologii sieci T oraz P – opartych o dane z rzeczywistych wdrożeń IoT.

Statystyka	T	P
Średnia	9.2	7.8
Odchylenie standardowe	1.7	1.5
Min.	7	7
Q1	7	7
Q2	9	7
Q3	11	8
Maks.	12	12

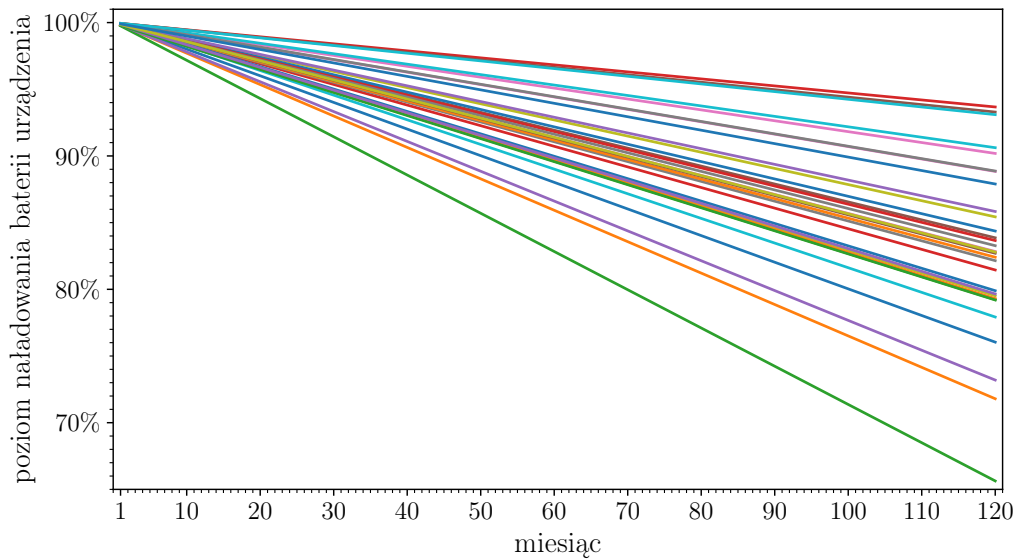
węzłowi relay wielu węzłów o ograniczonej łączności z siecią, zostawiając większą pulę pozostałych kandydatów z relatywnie niskim współczynnikiem SF dla innych węzłów wymagających przyporządkowania węzłów pośredniczących, podczas gdy metoda referencyjna, realizuje przyporządkowanie indywidualne tj., że pojedynczemu węzłowi relay przypisany zostaje dokładnie jeden węzeł o ograniczonej łączności z siecią. Różnice w wynikach uzyskane przy zastosowaniu obu metod są związane z odmiennym charakterem ich działania oraz zróżnicowanymi kryteriami wyboru, które wpływają na sposób podejmowania decyzji w procesie optymalizacji.

### Dostosowanie do zmiennych warunków propagacji sygnału

Zaproponowany algorytm stara się utrzymać przyporządkowanie wybranych węzłów relay w sieci tak długo, jak to możliwe. Zmienia on wybór jedynie tych węzłów relay, które posiadają niewystarczający zapas energii, aby zapewnić ciągłość działania dla oczekiwanego czasu operacyjnego sieci. Węzły relay, które nie wymagają zmiany, są zachowywane w niezmiennym stanie przypisania na kolejny okres. W rezultacie, jeśli warunki propagacji sygnału radiowego dla węzła relay nie ulegną pogorszeniu i będzie on działał przy tym samym lub niższym współczynniku rozpraszania SF, co podczas pierwotnego przypisania, nie będzie konieczności wyjścia tego węzła z działania w trybie relay przez bardzo długi czas.

Przygotowano dwa scenariusze symulacji, aby zilustrować to zachowanie. W pierwszym scenariuszu propagacja sygnału radiowego nie zmienia się w czasie, jak można zaobserwować na rysunku 6.6, poziom energii urządzeń relay stopniowo zmniejsza się, ale urządzenia te pozostają w trybie relay przez cały oczekiwany czas działania sieci.

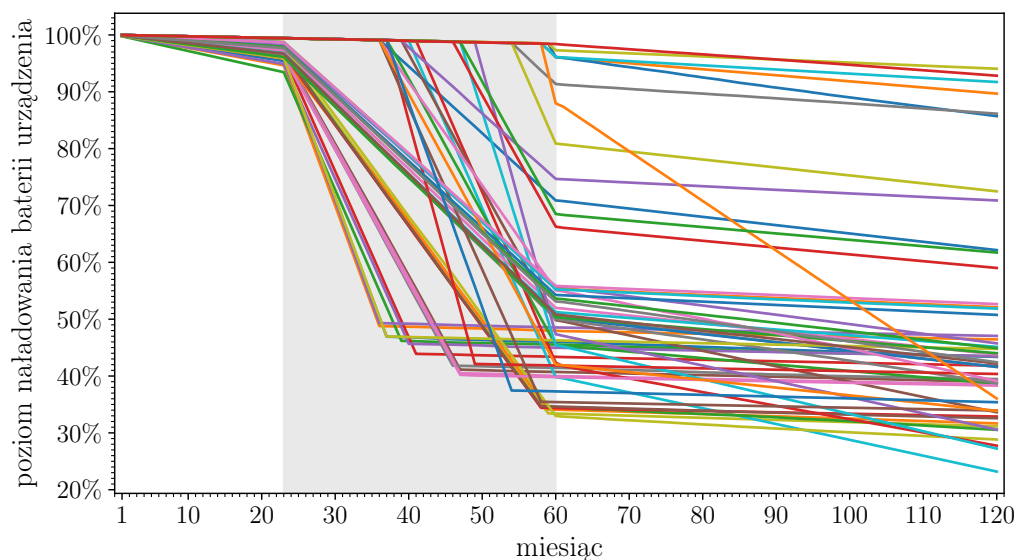
Drugi scenariusz symulacji został przygotowany, aby przetestować ciągłość operacyjną sieci w przypadku pogorszenia warunków transmisji z uwzględnieniem węzłów działających w trybie relay wskazanych przez zaproponowany algorytm. Między 23. a 60. miesiącem symulowanego okresu działania sieci



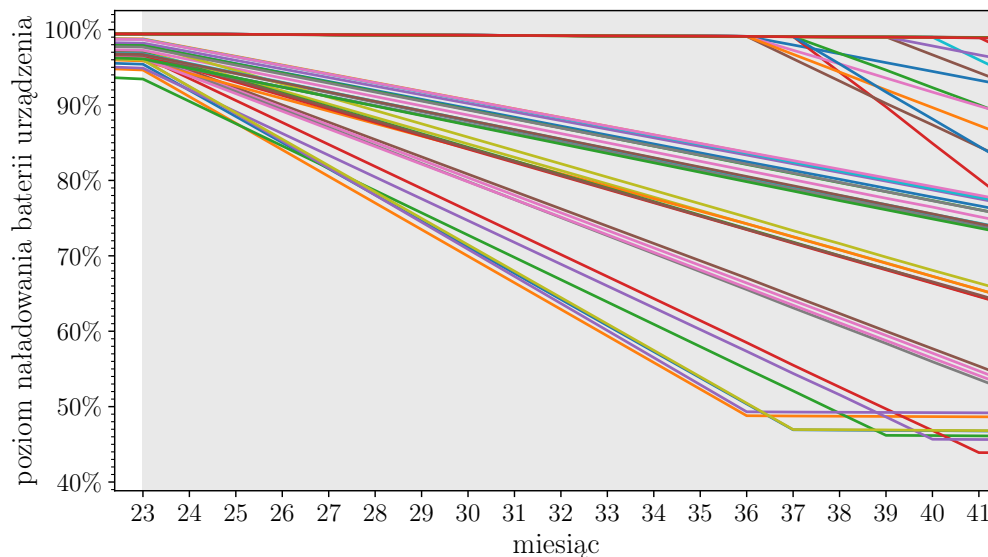
Rysunek 6.6: Zmiana poziomu naładowania baterii urządzeń relay w symulowanym okresie działania sieci w scenariuszu stabilnej propagacji sygnału radiowego dla przebiegu symulacji w scenariuszu testowym T(2.5%). Każda krzywa na rysunku odpowiada dokładnie jednemu urządzeniu relay z wynikowego zestawu węzłów sieci wskazanych do działania w tym trybie przez zaproponowany algorytm zachłanny.

tłumienie sygnału dla wszystkich węzłów działających w trybie relay zostaje zwiększone, aby transmisja pakietów przez węzły działające w tym trybie odbywała się wyłącznie przy użyciu najwyższego współczynnika rozpraszania  $SF=12$ , a więc w najbardziej pesymistycznym pod względem zużycia energii scenariuszu transmisji. Gdy w efekcie zastosowania procedury 3 okazuje się, że dany węzeł relay może nadal działać w tym trybie dla przypisanych mu węzłów o ograniczonej łączności z siecią, zużycie energii tego węzła znacząco wzrasta. Po 60. miesiącu wartość współczynnika SF dla wszystkich węzłów działających w trybie relay wraca do wartości początkowej.

Wyniki symulacji przedstawione na rysunku 6.7 pokazują jak zaproponowany algorytm, a w szczególności procedura 3, odpowiednio reaguje na pogorszone warunki propagacji sygnału radiowego, poprzez przełączanie innych urządzeń w tryb relay, zapewniając, że węzły początkowo działające w tym trybie zostaną zastąpione wystarczająco szybko, aby pozostać operacyjne jako zwykłe węzły końcowe przez skonfigurowany czas działania sieci. Przeprowadzony eksperyment pokazuje, że zaproponowany algorytm zachłanny umożliwia wyznaczenie węzłów pośredniczących, które gwarantują ciągłość działania sieci przez określony czas, ograniczając ryzyko przerwania ciągłości operacyjnej z powodu wyczerpania baterii urządzeń przed końcem skonfigurowanego czasu działania sieci.



Rysunek 6.7: Zmiana poziomu naładowania baterii w czasie dla urządzeń relaj w okresie działania sieci w scenariuszu z pogorszeniem warunków propagacji sygnału radiowego między 23. a 60. miesiącem dla przebiegu symulacji w scenariuszu testowym T(2.5%). Każda krzywa na wykresie odpowiada dokładnie jednemu węzłowi relaj z wynikowego zestawu węzłów wskazanych do działania w tym trybie przez zaproponowany algorytm zachłanny.



Rysunek 6.8: Rysunek pomocniczy ilustrujący powiększenie wybranego fragmentu z rysunku 6.7 z widocznymi przypadkami węzłów wyłączonych z działania w trybie relaj w 36., 37., 39., 40. i 41. miesiącu. W miesiącach tych, dla niektórych węzłów relaj, widoczna jest redukcja w tempie zużycia energii spowodowana zakończeniem pełnienia funkcji związanej z utrzymaniem łączności dla przypisanych mu wcześniej węzłów o ograniczonej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym.



Na rysunku pomocniczym 6.8 przedstawiono powiększenie fragmentu z rysunku 6.7 z przypadkami węzłów, które zakończyły działanie w trybie relay w okresie pogorszonej propagacji sygnału. Obserwowana redukcja w tempie zużycia energii dla poszczególnych węzłów relay, której początek następuje – w zależności od węzła – w miesiącach 37., 39., 40. i 41. spowodowana jest zakończeniem obsługi przypisanych mu wcześniej węzłów o ograniczonej łączności z siecią, a tym samym zaprzestaniem zużywania energii na pełnienie roli węzła relay dla tych węzłów. Po wyjściu węzła z działania w trybie relay powraca on do działania jako węzeł końcowy z początkową wartością współczynnika SF tzn. tą sprzed rozpoczęciem okresu pogorszonej propagacji sygnału dla węzłów relay.

## 6.4 Metoda wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących z redundancją

W sieciach LoRa komunikacja jest zawodna z uwagi na duże prawdopodobieństwo niedostarczenia pakietu np. ze względu na zjawisko interferencji. Zastosowanie redundancji w przydziale węzłów relay pozwala ograniczyć wpływ zakłóceń i zwiększyć prawdopodobieństwo skutecznego dostarczenia pakietu do bramy, ponieważ może on zostać przesłany przez 2 lub więcej węzłów pośredniczących. Redundancja zwiększa także odporność sieci na awarie, ponieważ pakiety danych mogą zostać dostarczone do bramy w przypadku awarii jednego z wyznaczonych węzłów relay. Takie podejście przyczynia się do zwiększenia niezawodności sieci poprzez minimalizację ryzyka utraty danych. Dlatego w kolejnym etapie pracy doktorskiej opracowałam algorytm pozwalający wyznaczyć lokalizacje węzłów pośredniczących dla znanego zbioru węzłów o ograniczonej łączności z siecią i zadanego współczynnika redundancji, określającego liczbę węzłów relay mających znajdować się w zasięgu każdego z obsługiwanych węzłów. Oprócz zapewnienia redundancji w rozmieszczeniu węzłów pośredniczących w sieci, celem opracowanego rozwiązania jest zapewnienie możliwie najlepszej efektywności energetycznej sieci. W efekcie, sieć działająca w konfiguracji wskazanej przez wynik algorytmu ma charakteryzować się jak najmniejszym zużyciem energii w sieci, maksymalizacją żywotności baterii, a w konsekwencji maksymalizacją czasu życia sieci, co istotne w kontekście zastosowań urządzeń zasilanych baterią w LoRaWAN w aplikacjach IoT.

Problem wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa rozszerzono o dodatkowe ograniczenie w postaci zapewnienia redundancji.

**Sformułowanie problemu** Sformułowanie problemu wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących z redundancją w sieci LoRa sprowadza się do sformułowania problemu 2 zdefiniowanego w podrozdziale 6.2.3 z następującą różnicą w treści punktu 3:

$$\forall u \in \mathcal{W}^* \deg_{G_J}(u) = k, \quad (6.11)$$

gdzie  $k \in \mathbb{N}$  – współczynnik redundancji oznaczający liczbę węzłów relay przyporządkowanych każdemu węzłowi o ograniczonej łączności z siecią. Tak sformułowany problem jest uogólnieniem problemu 2 (podrozdział 6.2.3), gdyż w

W celu rozwiązania postawionego problemu zaproponowałam algorytm wyboru lokalizacji węzłów relay z uwzględnieniem redundancji w sieci LoRa, bazujący na podejściu opisanych w rozdziale – 6 (algorytm 4) zmodyfikowanym o niektóre komponenty takie jak np. funkcja oceny węzła do działania w trybie relay (opisana w następnym podrozdziale 6.4.1) czy uwzględnienie współczynnika redundancji –  $k$  – zadanego jako parametr metody opisanej w dalszej części pracy.

### 6.4.1 Funkcja oceny węzła do działania w trybie relay

Podobnie jak w przypadku algorytmu 4 przedstawionego w rozdziale 6, zaproponowana metoda rozwiązania problemu przydziału węzłów relay z uwzględnieniem redundancji oparta jest o funkcję oceny węzła pod względem jego potencjału do działania w trybie relay. Funkcja ta umożliwia przypisanie każdemu węzłowi sieci pozycji w rankingu, zgodnie z ustalonymi kryteriami oceny. Zaproponowana funkcja oceny przyjmuje postać podobną do formuły 6.2 (podrozdział 6.1.1) z uwzględnieniem modyfikacji polegającej na zastąpieniu we wzorze funkcji komponentu nadwyżki energii  $E_v^+$  wskaźnikiem  $\theta_v$  odzwierciedlającym wielkość nadwyżki energii w przeliczeniu na wielkość pokrycia jaką jest w stanie zapewnić potencjalny węzeł  $v$  do pełnienia funkcji węzła pośredniczącego, przy zachowaniu ograniczeń związanych ze zużyciem energii.

Funkcja oceny potencjału węzła sieci do działania w trybie relay, zaproponowana przeze mnie, wyrażona jest w następujący sposób:

$$g(v) = \frac{\theta_v \times 2^{12-SF_{vgv}}}{t_v}, \quad (6.12)$$

gdzie parametry  $t_v$  oraz  $SF_{vgv}$  zdefiniowano w podrozdziale 2.4.2, parametr  $\theta_v$  wyraża maksymalną liczbę węzłów ze zbioru  $\mathcal{W}^*$  sąsiadujących (w grafie  $\mathcal{G}_H$  – 6.4, podrozdział 6.2.2) z węzłem  $v \in \mathcal{P}^*$  (6.3), których stopień w grafie wynikowym  $G_J$  (zdefiniowanym w podrozdziale 6.2) jest mniejszy od wartości współczynnika redundancji  $k$ , oraz których sumaryczny koszt energetyczny związany z ich obsługą przez węzeł  $v \in \mathcal{P}^*$  nie przekracza jego poziomu nadwyżki energii:

$$\theta_v = \max\{|\mathcal{E}_v| : \mathcal{E}_v \subset \mathcal{E}_H, \mathcal{E}_v = \{(w, v) : w \in N_{\mathcal{G}_H}(v) \wedge \deg_{G_J}(w) < k\} \wedge \sum_{e \in \mathcal{E}_v} \Omega_e \leq E_v^+\}, \quad (6.13)$$

gdzie parametry  $\Omega_e$  (6.6) oraz  $E_v^+$  (6.1) zdefiniowano w podrozdziale 6.2.2. Zatem wartość parametru  $\theta_v$  zależy od poziomu nadwyżki energii  $E_v^+$  jaką posiada węzeł  $v$  oraz kosztu energetycznego (zdefiniowanego za pomocą wagi  $\Omega - 6.6$ ) jaki przypada na obsługę sąsiednich węzłów o ograniczonej łączności z siecią znajdujących się w jego zasięgu, które mogłyby zostać mu przypisane. Wielkość wskaźnika pokrycia  $\theta_v$  (6.13) dla potencjalnego węzła relay  $v$  zmienia się w trakcie wykonania algorytmu.

### 6.4.2 Wybór lokalizacji węzłów pośredniczących z redundancją

Poniżej, w **Algorytm 7** przedstawiono pseudokod algorytmu wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących z redundancją w sieci LoRa. Redundancja określona jest przez wartość współczynnika zadanego parametrem metody –  $k$ . Poza współczynnikiem redundancji  $k$ , algorytm ten jako dane wejściowe przyjmuje taki sam zestaw danych wejściowych jak algorytm 4, zdefiniowane we wcześniejszej części rozdziału (6.2.2). Są to zbiór węzłów  $\mathcal{W}^*$  o ograniczonej łączności z siecią wymagających przyporządkowania węzłów pośredniczących, zbiór potencjalnych węzłów relay  $\mathcal{P}^*$  (6.3) oraz graf potencjalnych węzłów relay  $\mathcal{G}_H = (\mathcal{V}_H, \mathcal{E}_H, \Omega)$  (6.4) opisujący relację pomiędzy węzłami ze zbiorów  $\mathcal{W}^*$  i  $\mathcal{P}^*$ . W trakcie wykonania algorytmu 7 aktualizacja wartości parametru

---

**Algorytm 7** Wybór lokalizacji węzłów pośredniczących z redundancją. Parametr  $k$  jest współczynnikiem redundancji. Algorytm zwraca graf  $G_J = (V_J, E_J)$  przechowujący wynikowy zestaw węzłów relay wraz z ich przyporządkowaniem do węzłów o ograniczonej łączności ze zbioru  $\mathcal{W}^*$ , takie że  $\forall w \in \mathcal{W}^* \deg_{G_J}(w) = k$ .

---

```

1: function ASSIGN_RELAYS_WITH_REDUNDANCY( $\mathcal{W}^*$ ,  $\mathcal{P}^*$ ,  $\mathcal{G}_H =$ 
   ( $\mathcal{V}_H, \mathcal{E}_H, \Omega$ ),  $G_J = (V_J, E_J)$ ,  $k$ )
2:   while  $\{w : w \in \mathcal{W}^* \wedge \deg_{G_J}(w) < k\} \neq \emptyset$  do
3:     Aktualizacja  $\theta_v \forall v \in \mathcal{P}^*$ 
4:      $r \leftarrow \arg \max_{v \in \mathcal{P}^*} g(v)$ 
5:      $S \leftarrow \{u : u \in N_{\mathcal{G}_H}(r) \wedge \deg_{G_J}(u) < k\}$ 
6:     while  $\sum_{w \in N_{G_J}(r)} \Omega_{wr} \leq E_r^+$  do
7:        $w \leftarrow \arg \min_{w \in S} \Omega_{rw}$ 
8:        $S \leftarrow S \setminus \{w\}$ 
9:        $E_J \leftarrow E_J \cup \{(w, r)\}$ 
10:     $\mathcal{R} \leftarrow \mathcal{R} \cup \{r\}$ 
11:     $\mathcal{P}^* \leftarrow \mathcal{P}^* \setminus \{r\}$ 
12:  return  $G_J = (V_J, E_J)$ 

```

---

$\theta_v \forall v \in \mathcal{P}^*$  (linia 3 w algorytmie 7) odbywa się za każdym razem, gdy na-

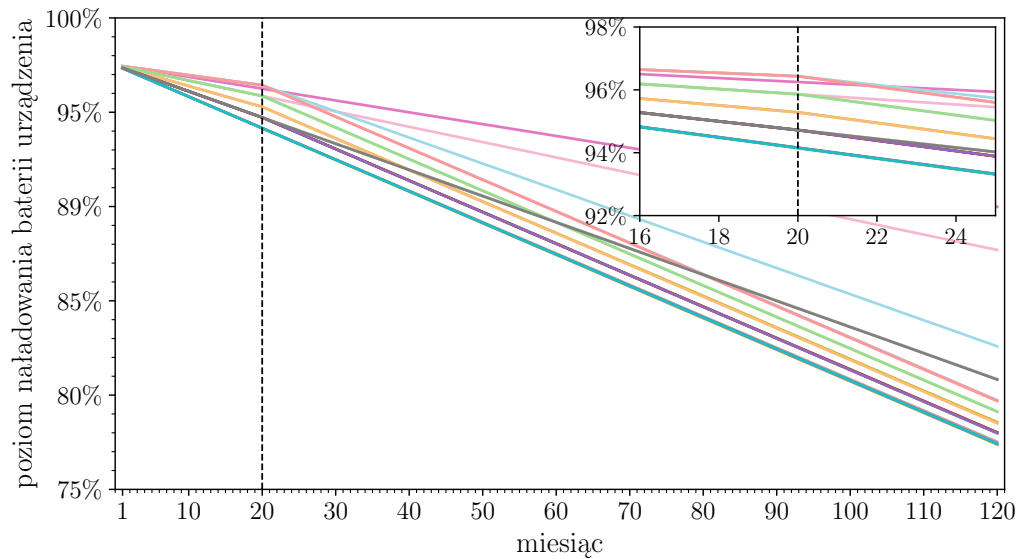
leży wskazać kolejny węzeł sieci do działania w trybie relay. Wraz z wyborem danego węzła do działania w trybie relay przez metodę, identyfikowany jest obszar jego działania poprzez przyporządkowanie mu niepokrytych jeszcze węzłów o ograniczonej łączności z siecią znajdujących się w jego zasięgu z zachowaniem ograniczeń związanych ze zużyciem energii urządzenia zasilanego baterią. W wyniku tego przypisania zmiana ulega potencjał innych potencjalnych węzłów do działania w trybie relay ze względu na zmniejszenie puli węzłów o ograniczonej łączności wymagających przyporządkowania węzłów pośredniczących.

### 6.4.3 Rezultaty algorytmu wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących z redundancją

W celu weryfikacji skuteczności zaproponowanego algorytmu wyboru lokalizacji węzłów relay z redundancją w sieci LoRa przeprowadzono eksperyment symulacyjny z wykorzystaniem środowiska ewaluacyjnego opisanego w rozdziale 4. Przeprowadzono symulację działania sieci LoRa w okresie 10 lat w scenariuszu topologii sieci rzeczywistego wdrożenia IoT P(5%) z uwzględnieniem węzłów pośredniczących wskazanych przez algorytm 7 dla współczynnika redundancji  $k = 2$ . W tym scenariuszu część węzłów sieci działających dotychczas w trybie relay przestaje pełnić tę funkcję w 20. miesiącu symulowanego okresu działania sieci. W tym czasie inne węzły relay zapewniają łączność dla węzłów obsługiwanych dotychczas przez węzły pośredniczące, które przerwały pełnienie tej funkcji. Na rysunku 6.9 zaprezentowano zmianę poziomu naładowania baterii urządzeń relay w trakcie okresu działania sieci równego 10 lat, podczas którego w 20. miesiącu nastąpiło przerwanie pracy części węzłów relay, a obsługę grupy urządzeń z ograniczoną łącznością z siecią przyporządkowanych do urządzeń relay, które uległy awarii pełnią inne węzły pośredniczące wskazane przez algorytm 7. Widoczna po 20. miesiącu zmiana w tempie zużycia energii dla niektórych węzłów relay spowodowana jest zwiększeniem zużycia energii przez zapewnienie łączności dla przypisanych im węzłów o ograniczonej łączności z siecią zapewniając redundancję w obliczu awarii części urządzeń relay.

Przeprowadzono inny eksperyment symulujący działanie sieci w okresie dziesięciu lat, którego scenariusz uwzględnia przywrócenie do działania w trybie relay węzłów sieci, których ciągłość operacyjna uległa przerwaniu w rozpatrywanym okresie działania sieci.

Scenariusz symulacyjny uwzględnia przerwanie pracy w trybie relay dla części urządzeń wraz z nastaniem 20. miesiąca w symulowanym okresie operacyjnym sieci oraz przywrócenie do działania w trybie relay ów węzłów w 60. miesiącu rozpatrywanego okresu działania sieci. Wówczas, między 20. a 60. miesiącem działania sieci obsługę węzłów o ograniczonej łączności z siecią przyporządkowanych węzłom relay, które uległy awarii na ten czas, pełnią inne urządzenia relay wskazane przez algorytm 7 dla współczynnika redun-

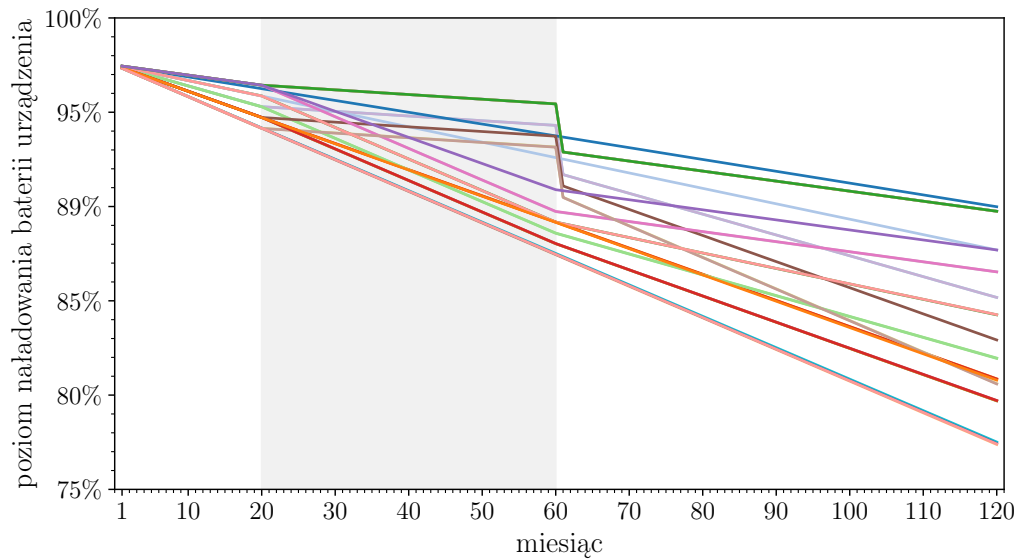


Rysunek 6.9: Zmiana poziomu naładowania baterii urządzeń działających w trybie relay w scenariuszu P(5%) w symulowanym okresie działania sieci równym 10 lat. Scenariusz uwzględnia wyjście części urządzeń sieci z działania w trybie relay w 20. miesiącu okresu operacyjnego sieci oraz realizację ich funkcji przez inne urządzenia relay wskazane przez metodę 7 dla współczynnika redundancji  $k = 2$ . Każda krzywa na wykresie odpowiada dokładnie jednemu urządzeniu relay.

dancji  $k = 2$ .

Przebieg poziomu zużycia energii węzłów relay dla tego scenariusza symulacyjnego przedstawiono na rysunku 6.10. Widoczne w okresie pomiędzy 20. a 60. miesiącem zwiększone zużycie energii dla niektórych węzłów relay spowodowane jest zapewnieniem utrzymania łączności dla urządzeń obsługiwanych dotychczas przez węzły relay, których praca w tym trybie została przerwana wraz z nastaniem 20. miesiąca rozpatrywanego okresu działania sieci. W 61. miesiącu symulowanego okresu działania sieci, poziom zużycia energii dla urządzeń przywróconych do działania w trybie relay gwałtownie spada z powodu zapewnienia utrzymania łączności dla przydzielonych im węzłów o ograniczonej łączności z siecią.

W obydwu scenariuszach eksperymentów wynikowy zestaw lokalizacji węzłów pośredniczących z zapewnieniem redundancji  $k = 2$  wskazany przez algorytm 7 zapewnia objęcie zasięgiem sieci wszystkie węzły o ograniczonej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym tak, że każdemu takiemu węzłowi przyporządkowuje  $k$  węzłów relay, gdzie  $k = 2$ . Ponadto, metoda wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących z uwzględnieniem redundancji w rezultacie, do działania w trybie relay wskazuje węzły z możliwie największym zapasem energii i jak najniższym współczynnikiem SF w komunikacji pomiędzy węzłem pośredniczącym a punktem dostępowym, co przyczynia się do



Rysunek 6.10: Zmiana poziomu naładowania baterii urządzeń działających w trybie relay w symulowanym okresie działania sieci równym 10 lat w scenariuszu P(5%). Eksperyment uwzględnia wyjście części urządzeń z działania w trybie relay na okres przypadający pomiędzy 20. a 60. miesiącem symulowanego czasu działania sieci oraz pełnienie ich funkcji w tym czasie przez inne urządzenia relay wskazane przez metodę 7 dla współczynnika redundancji  $k = 2$ . Każda krzywa na rysunku odpowiada dokładnie jednemu urządzeniu relay.

maksymalizacji żywotności baterii urządzenia. Przydział węzłów o ograniczonej łączności z siecią do obsługi przez dany węzeł pośredniczący zależy od jego poziomu zapasu energii, co pozwala na zachowanie ograniczeń związanych ze zużyciem energii urządzenia zasilanego baterią.

## 6.5 Podsumowanie

W niniejszym rozdziale przedstawiono algorytm wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa zaprojektowany do cyklicznego uruchamiania w celu okresowej rekonfiguracji sieci w odpowiedzi na zmienne warunki propagacji sygnału radiowego. W procesie walidacji zaproponowanej metody posłużono się zaprojektowanym na potrzeby badań środowiskiem ewaluacji metod wyboru lokalizacji węzłów relay w sieci LoRa obejmującego model symulacyjny oraz wykorzystanie symulatora zdarzeń dyskretnych OMNeT++. W eksperymentach symulacyjnych uwzględniono scenariusze topologii sieci o losowym rozmieszczeniu węzłów w sieci oraz w oparciu o dane pochodzące z rzeczywistych wdrożeń IoT. Skuteczność zaproponowanej metody zweryfikowano także dla zróżnicowanego odsetka węzłów sieci wymagających przypo-

rządowania węzłów relay. Wyniki eksperymentów symulacyjnych porównano z wynikami metody [32] optymalizującej wybór węzłów relay w sieci pod względem oszczędzania energii.

Wyniki eksperymentów symulacyjnych przedstawione w podrozdziale 6.3 wskazują, że w odniesieniu do metody referencyjnej [32] opracowany w ramach rozprawy algorytm zachłanny osiąga poziom zużycia energii w całej sieci mniejszy o średnio od 0.18% do 7.96% w zależności od scenariusza topologii sieci. Eksperymenty symulacyjne potwierdzają, że zaproponowany algorytm zachłanny zapewnia możliwość wskazania takich węzłów pośredniczących, które zapewnią działanie sieci przez zadany czas. Przedstawiony algorytm zachłanny może być skuteczny dla różnych wartości odsetka urządzeń o ograniczonej bezpośredniej łączności z siecią, wymagających przyporządkowania węzłów pośredniczących, zarówno w topologiach o losowym rozmieszczeniu węzłów w sieci, jak i reprezentujących rzeczywiste wdrożenia IoT. We wszystkich przypadkach topologii sieci wskazany przez zaproponowaną metodę zachłanną zestaw lokalizacji węzłów relay umożliwił pełne połączenie dla węzłów o ograniczonej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym, zapewniając jednocześnie niższe zużycie energii w sieci niż rozwiązanie wskazane przez metodę referencyjną [32]. Wyniki eksperymentów symulacyjnych wskazują, że zaproponowany algorytm osiąga lepsze rezultaty pod względem efektywności energetycznej sieci niż metoda referencyjna [32], co dodatkowo potwierdzono jako istotne statystycznie.

W ramach opracowanej metody optymalizacji wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa zaproponowano funkcję pozwalającą na przypisanie węzłowi końcowemu sieci pozycji w rankingu, zgodnie z ustalonymi kryteriami oceny potencjału do pełnienia funkcji węzła pośredniczącego. Zaproponowany algorytm uwzględnia analizę bieżącego poziomu naładowania baterii urządzenia i blokuje wybór węzłów sieci, dla których działanie w trybie relay mogłoby skrócić żywotność baterii urządzenia poniżej określonego progu, co istotne w kontekście zastosowań urządzeń zasilanych baterią w technologii LoRaWAN w aplikacjach IoT.

Zaproponowana metoda stanowi bardziej kompleksowe podejście względem algorytmu zaproponowanego w rozdziale 5 i została opracowana na podstawie prac z nim związanych. Nowe podejście nie tylko odpowiada na wcześniej zidentyfikowane wyzwania (np. związane z zachowaniem ograniczeń dot. zużycia energii), ale stanowi mechanizm zaprojektowany do cyklicznego uruchamiania, w celu okresowej rekonfiguracji sieci w odpowiedzi na zmieniające się warunki propagacji sygnału radiowego. Takie podejście wspiera efektywne zarządzanie energią w sieci w przeciwieństwie do metod, które nie uwzględniają dynamicznego dostosowania do bieżących warunków transmisji. Ponadto, rozwinięta metoda unika niepotrzebnej nadmiarowości w liczbie lokalizacji węzłów wybranych do działania w trybie relay. Koncepcja zaproponowanego mechanizmu jest zgodna z ideą tzw. sieci samonaprawiających się (ang. self-healing), które charakteryzują się zdolnością do autonomicznego re-

agowania na usterki lub awarie bez konieczności ingerencji człowieka. Zaproponowane podejście umożliwia dynamiczne dostosowanie lokalizacji węzłów pośredniczących w reakcji na zmieniające się warunki propagacyjne oraz poziom zużycia energii, oraz zarządzanie topologią sieci w odpowiedzi na zmiany następujące w jej infrastrukturze np. pojawienie się nowych urządzeń.

W końcowym etapie prac rozważono uogólnienie problemu wyboru lokalizacji węzłów relay tzn. z uwzględnieniem redundancji w wyborze węzłów pośredniczących. W oparciu o opracowaną metodę zachłanną zaproponowano podejście znajdujące zestaw lokalizacji węzłów relay zoptymalizowany pod względem oszczędzania energii w urządzeniach i przy zapewnieniu, aby każdy węzeł o ograniczonej łączności z siecią znajdował się w zasięgu określonej liczby węzłów relay, zadanej parametrem metody (współczynnikiem redundancji). Celem tych rozważań jest propozycja rozwiązania przyczyniającego się do zwiększenia niezawodności działania sieci w przypadku wystąpienia awarii urządzeń relay. Przedstawione w niniejszym rozdziale rezultaty są rozszerzeniem prac opisanych w artykule [38], którego jestem współautorką.



# Rozdział 7

## Podsumowanie

W niniejszej pracy podjęto problematykę wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących (ang. relay) w sieci LoRa w odpowiedzi na wyzwanie związane z występowaniem obszarów o ograniczonym zasięgu w sieciach LPWAN, tzn. miejsc, gdzie urządzenia nie są w stanie skutecznie komunikować się z siecią. Tematyka zastosowania węzłów pośredniczących otwiera nowe obszary badawcze, gdyż do tej pory transmisja w sieciach LPWAN realizowana była bezpośrednio pomiędzy węzłem końcowym sieci a punktem dostępowym (bez udziału urządzenia pośredniczącego w transmisji). Zastosowanie urządzeń relay w technologii LoRa stanowi przedmiot dyskusji w odpowiednich organizacjach standaryzacyjnych – w 2022 roku stowarzyszenie LoRa Alliance opublikowało oficjalną specyfikację funkcjonalności relay dla LoRaWAN, co potwierdza, że zagadnienie to wykracza poza teoretyczne analizy, odzwierciedlając uzasadnienie praktyczne. Jednak specyfikacja ta nie odpowiada na pytanie, w jakich lokalizacjach w sieci zainstalować fizyczne urządzenia relay, aby w sposób efektywny zarządzać energią w sieci, co stanowi dodatkową motywację dla przeprowadzonych w ramach niniejszej rozprawy badań.

W ramach rozwiązania dla postawionego w niniejszej rozprawie problemu zaproponowano nowe metody wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa, obejmujące zestaw autorskich procedur, spostrzeżeń i kryteriów uwzględniających odpowiednie parametry oraz charakterystykę środowiska technologii LoRa w celu efektywnego zarządzania energią w sieci. Celem zaproponowanych w rozprawie metod optymalizacyjnych jest minimalizacja zużycia energii w sieci, maksymalizacja żywotności baterii urządzeń, a w konsekwencji maksymalizacja czasu życia sieci, co istotne w kontekście zastosowań urządzeń zasilanych baterią w technologii LoRaWAN w aplikacjach IoT. W efekcie, sieć działająca w konfiguracji wskazanej przez wynik metody charakteryzuje się efektywnym wykorzystaniem zasobów i możliwie najmniejszym zużyciem energii.

Pracę nad projektowaniem zaproponowanych w niniejszej rozprawie metod rozpoczęto od przeprowadzenia analizy zbioru danych pozyskanego w ramach projektu SCIoT (7) i obejmującego pomiary dotyczące transmisji, ze-

brane z komercyjnych wdrożeń IoT złożonych z kilku tysięcy urządzeń działających w technologii LoRa. Wyniki przeprowadzonych analiz wskazują na występowanie problemu z łącznością dla kilku procent urządzeń sieci oraz, że rozwiązanie tego problemu w postaci zastosowania węzłów relay rozmieszczonych w odpowiednich lokalizacjach znajduje uzasadnienie i stanowi efektywną alternatywę dla innych metod pokrycia białych plam zasięgu sieci. Ponadto, uzyskane rezultaty analiz wykazują zgodność z ekspertyzą i założeniami lidera w rozwoju ekosystemu technologii LoRa – firmy Semtech. Wyniki i spostrzeżenia przeprowadzonych przeze mnie analiz zbioru danych pochodzących z rzeczywistych wdrożeń IoT stanowią rozszerzenie prac opublikowanych w artykule [39]. Ponadto, rozpatrywany w niniejszej rozprawie zbiór danych jest – według mojej najlepszej wiedzy – niespotykany jak dotąd w literaturze, a jego potencjał został także wykorzystany w przeprowadzeniu badań, których wyniki opublikowano w artykułach [40, 41, 42, 43], których jestem współautorką.

W rozprawie zaproponowano nowe funkcje dla procedur optymalizacji wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa, gdzie głównym optymalizowanym zasobem jest energia. Istotnym aspektem zaproponowanych metod w dążeniu do zapewnienia efektywnego zarządzania energią w sieci jest uwzględnienie analizy poziomu naładowania baterii urządzenia z uwzględnieniem ograniczeń dotyczących poziomu zużycia energii w urządzeniu. Kluczowe w ocenie potencjału węzła sieci do działania w trybie relay są poziom zapasu energii urządzenia oraz uwzględnienie parametru SF mającego wpływ na poziom zużycia energii podczas transmisji pakietu.

W efekcie, wynikowe węzły relay charakteryzują się wysokim zapasem energii oraz niską wartością współczynnika SF, dzięki czemu mogą dłużej zapewnić ciągłość działania i utrzymanie łączności dla węzłów niemogących skutecznie komunikować się z siecią. Ponadto, przyporządkowanie węzłów relay do węzłów o ograniczonej łączności z siecią zoptymalizowane jest pod względem minimalizacji kosztu energetycznego związanego z zapewnieniem utrzymania łączności, wyznaczonego w oparciu o analizę istotnego w kontekście zużycia energii współczynnika SF w komunikacji pomiędzy urządzeniami. Takie podejście pozwala na efektywne zarządzanie energią w sieci, maksymalizację żywotności baterii urządzenia, a w efekcie wydłużenie czasu życia sieci.

W początkowym etapie prac w ramach niniejszej rozprawy, problem wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa rozpatrzono jako problem przyporządkowania w grafie (rozdział 5). W celu jego rozwiązania zaproponowano podejście heurystyczne, które stanowi alternatywę dla metod dokładnych w przypadkach grafów rzadkich, gdyż daje rozwiązania bliskie optymalnym w krótszym czasie. Rezultaty uzyskane w ramach pracy nad tym rozwiązaniem opublikowano w pracy [37]. Eksperymenty symulacyjne wskazują, że zaproponowane podejście wykazuje wyższą skuteczność pod względem maksymalizacji czasu życia sieci, niż metoda referencyjna [32].

W kolejnym etapie prac skoncentrowano się na opracowaniu bardziej kom-

pleksowego rozwiązania, opartego na podejściu zachłannym (opisanym w rozdziale 6). Zaproponowana metoda nie tylko odpowiada na wcześniej zidentyfikowane wyzwania, ale obejmuje nowy mechanizm zaprojektowany do cyklicznego uruchamiania, w celu okresowej rekonfiguracji sieci w odpowiedzi na zmieniające się warunki propagacji sygnału radiowego. Ponadto, rozwinięta metoda unika niepotrzebnej nadmiarowości w liczbie lokalizacji węzłów wybranych do działania w trybie relay. W końcowym etapie prac rozpatrzono uogólnienie problemu wyboru lokalizacji węzłów relay tj. z uwzględnieniem redundancji. W oparciu o opracowaną metodę zachłanną zaproponowano podejście znajdujące zestaw lokalizacji węzłów relay przy zapewnieniu, aby każdy węzeł o ograniczonej łączności z siecią znajdował się w zasięgu określonej liczby węzłów relay, zadanej parametrem metody (współczynnikiem redundancji). Takie podejście przyczynia się zwiększenia niezawodności działania sieci w przypadku wystąpienia awarii urządzeń relay.

Skuteczność zaproponowanych algorytmów sprawdzono z zastosowaniem zaprojektowanego na potrzeby badań środowiska ewaluacji metod wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa obejmującego model symulacyjny oraz wykorzystanie symulatora zdarzeń dyskretnych OMNeT++. W procesie ewaluacji metod uwzględniono scenariusze topologii sieci o losowym rozmieszczeniu węzłów w sieci oraz odzwierciedlające rozmieszczenie węzłów w rzeczywistych wdrożeniach IoT. Skuteczność metod została zweryfikowana dla różnych wartości odsetka urządzeń sieci o ograniczonej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym, wymagających przyporządkowania węzłów pośredniczących. Otrzymane rezultaty porównano z wynikami implementacji referencyjnej metody wyboru węzłów relay [32] zoptymalizowanej pod względem oszczędzania energii. Wyniki eksperymentów symulacyjnych potwierdzają, że zaproponowany algorytm zachłanny wyboru lokalizacji węzłów relay w sieci LoRa (opisany w rozdziale 6) zapewnia możliwość wskazania takich węzłów pośredniczących, które zapewnią działanie sieci przez zadany czas, ograniczając ryzyko przerwania ciągłości operacyjnej spowodowane przedwczesnym wyczerpaniem baterii urządzenia. Rezultaty symulacji wskazują, że poziom zaoszczędzonej energii w sieci osiągną zaproponowaną metodą zachłanną wynosi średnio od 0.19% do 7.96% w zależności od scenariusza topologii sieci. Uzyskane rezultaty potwierdzają, że zaproponowany w niniejszej rozprawie algorytm osiąga lepsze rezultaty pod względem zapewnienia efektywności energetycznej sieci niż metoda referencyjna.

Zaproponowany w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej mechanizm zaprojektowany do cyklicznego uruchamiania w celu okresowej rekonfiguracji sieci w odpowiedzi na zmienne warunki propagacji sygnału radiowego wspiera efektywne zarządzanie energią w sieci w przeciwieństwie do metod, które nie uwzględniają dynamicznego dostosowania do bieżących warunków propagacyjnych. Opracowany mechanizm blokuje wybór węzłów, dla których działanie w trybie relay mogłoby skrócić żywotność baterii urządzenia przed końcem przewidywanego okresu działania.

Ponadto idea zaproponowanego mechanizmu wpisuje się w koncepcję tzw. sieci samonaprawiających się (ang. self-healing) lub autonaprawy sieci, czyli zdolności sieci do podejmowania odpowiednich działań w odpowiedzi na wykrycie usterek lub awarii, bez konieczności interwencji człowieka. Zaproponowane podejście umożliwia nadążną zmianę wyboru lokalizacji węzłów relay w odpowiedzi na zmieniające się warunki propagacji sygnału czy zużycie baterii oraz zarządzanie topologią sieci w odpowiedzi na zmiany następujące w jej infrastrukturze, np. pojawienie się nowych urządzeń. Zaprezentowane w rozprawie badania nad opracowaniem algorytmu opisanego w rozdziale 6 stanowią rozszerzenie prac opisanych w artykule [38], którego jestem współautorką.

Zaprezentowane w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej wyniki potwierdzają spełnienie celu pracy, jakim jest rozwiązanie postawionego problemu badawczego oraz potwierdzenie tezy, że odpowiedni dobór lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa poprawia efektywność energetyczną sieci.

# Bibliografia

- [1] S. Madakam, R. Ramaswamy, S. Tripathi, Internet of Things (IoT): A literature review, *Journal of Computer and Communications* 3 (5) (2015) 164–173.
- [2] U. Raza, P. Kulkarni, M. Sooriyabandara, Low Power Wide Area Networks: An Overview, *IEEE Communications Surveys and Tutorials* 19 (2) (2017) 855–873. doi:10.1109/COMST.2017.2652320.
- [3] B. S. Chaudhari, M. Zennaro, S. Borkar, LPWAN technologies: Emerging application characteristics, requirements, and design considerations, *Future Internet* 12 (3) (2020) 46.
- [4] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, M. Zorzi, Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios, *IEEE Wireless Communications* 23 (5) (2016) 60–67.
- [5] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, F. Meyer, A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment, *ICT express* 5 (1) (2019) 1–7.
- [6] A. Ikpehai, B. Adebisi, K. M. Rabie, K. Anoh, R. E. Ande, M. Hammoudeh, H. Gacanin, U. M. Mbanaso, Low-power wide area network technologies for Internet-of-Things: A comparative review, *IEEE Internet of Things Journal* 6 (2) (2018) 2225–2240.
- [7] M. Iqbal, A. Y. M. Abdullah, F. Shabnam, An Application Based Comparative Study of LPWAN Technologies for IoT Environment, in: 2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYPMP), 2020, pp. 1857–1860. doi:10.1109/TENSYPMP50017.2020.9230597.
- [8] L. S. Vailshery, Number of Internet of Things (IoT) connections worldwide from 2022 to 2023, with forecasts from 2024 to 2033, Published by Statista: <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/>, [Dostęp: 2024-09-11] (Sep 2024).
- [9] Semtech Corporation, LoRa<sup>®</sup> Technology | Semtech, <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora/>, [Dostęp: 2024-04-03] (2023).

- [10] H. Fattah, 5G LTE Narrowband Internet of Things (NB-IoT), CRC Press, 2018.
- [11] UnaBiz, What is Sigfox Technology, [Dostęp: 2024-04-05] (2022).  
URL <https://www.sigfox.com/what-is-sigfox/>
- [12] LoRa Alliance, About LoRaWAN<sup>®</sup>, [Dostęp: 2024-04-03] (2024).  
URL <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>
- [13] Wikipedia, Pasmó ISM, [Dostęp: 2024-04-03] (2024).  
URL [https://pl.wikipedia.org/wiki/Pasmó\\_ISM](https://pl.wikipedia.org/wiki/Pasmó_ISM)
- [14] Semtech Corporation, <https://www.semtech.com/>, [Dostęp: 2024-04-07].
- [15] P. van Eijk, LoRa Basics<sup>™</sup> Modem Relay: A Low-Cost Battery Powered Network Extender, White Paper, Semtech Corporation (2023).
- [16] B. Al Homssi, A. Al-Hourani, K. Magowe, J. Delaney, N. Tom, J. Ying, H. Wolf, S. Maselli, S. Kandeepan, K. Wang, et al., A Framework for the Design and Deployment of Large-Scale LPWAN Networks for Smart Cities Applications, *IEEE Internet of Things Magazine* 4 (1) (2020) 53–59.
- [17] M. Stusek, D. Moltchanov, P. Masek, K. Mikhaylov, J. Hosek, S. Andreev, Y. Koucheryavy, P. Kustarev, O. Zeman, M. Roubicek, LPWAN Coverage Assessment Planning Without Explicit Knowledge of Base Station Locations, *IEEE Internet of Things Journal* 9 (6) (2022) 4031–4050. doi:10.1109/JIOT.2021.3102694.
- [18] N. A. B. Masadan, M. H. Habaebi, S. H. Yusoff, Lora lpwan propagation channel modelling in iium campus, in: 2018 7th International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE), 2018, pp. 14–19. doi:10.1109/ICCCE.2018.8539327.
- [19] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski, B. Musznicki, LoRaWAN Metering Infrastructure Planning in Smart Cities, *Applied Sciences* 13 (14). doi:10.3390/app13148431.  
URL <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/14/8431>
- [20] A. Frankiewicz, A. Glos, K. Grochla, Z. Łaskarzewski, J. Miszczak, K. Połys, P. Sadowski, A. Strzoda, Lp wan gateway location selection using modified k-dominating set algorithm, in: *Modelling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems: 28th International Symposium, MASCOTS 2020, Nice, France, November 17–19, 2020, Revised Selected Papers 28*, Springer, 2021, pp. 209–223.

- [21] A. R. Mishra, *Advanced Cellular Network Planning and Optimisation: 2G/2.5 G/3G... Evolution to 4G*, John Wiley & Sons, 2007.
- [22] K. Tutschku, Demand-based radio network planning of cellular mobile communication systems, in: *Proceedings. IEEE INFOCOM '98, the Conference on Computer Communications. Seventeenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Gateway to the 21st Century* (Cat. No.98, Vol. 3, 1998, pp. 1054–1061 vol.3. doi:10.1109/INFOCOM.1998.662915.
- [23] L. Song, J. Shen, *Evolved cellular network planning and optimization for UMTS and LTE*, CRC press, 2010.
- [24] LoRa Alliance, LoRa Alliance Home page, <https://lora-alliance.org/>, [Dostęp: 2024-03-13] (2015).
- [25] L. Alliance, LoRaWAN Relay Specification TS011-1.0.0, <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/ts011-1-0-0-relay>, [Dostęp: 2024-03-13] (2022).
- [26] S. Barrachina-Muñoz, B. Bellalta, T. Adame, A. Bel, Multi-hop communication in the uplink for LPWANs, *Computer Networks* 123 (2017) 153–168.
- [27] M. Anedda, C. Desogus, M. Murrioni, D. D. Giusto, G.-M. Muntean, An Energy-efficient Solution for Multi-Hop Communications in Low Power Wide Area Networks, in: *2018 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, 2018, pp. 1–5. doi:10.1109/BMSB.2018.8436722.
- [28] W. Xu, G. Cai, Y. Fang, S. Mumtaz, G. Chen, Performance Analysis and Resource Allocation for a Relaying LoRa System Considering Random Nodal Distances, *IEEE Transactions on Communications* 70 (3) (2022) 1638–1652. doi:10.1109/TCOMM.2022.3146289.
- [29] W. Xu, G. Cai, Y. Fang, G. Chen, Performance Analysis of a Two-Hop Relaying LoRa System, in: *2021 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, 2021, pp. 540–545. doi:10.1109/ICCC52777.2021.9580324.
- [30] D. Mugerwa, Y. Nam, H. Choi, Y. Shin, E. Lee, SF-Partition-Based Clustering and Relaying Scheme for Resolving Near-Far Unfairness in IoT Multihop LoRa Networks, *Sensors* 22 (23). doi:10.3390/s22239332. URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/23/9332>
- [31] E. Sisinni, P. Ferrari, D. Fernandes Carvalho, S. Rinaldi, P. Marco, A. Flammini, A. Depari, LoRaWAN Range Extender for Industrial IoT,

- IEEE Transactions on Industrial Informatics 16 (8) (2020) 5607–5616. doi:10.1109/TII.2019.2958620.
- [32] Y. Li, C. Liao, Y. Wang, C. Wang, Energy-efficient optimal relay selection in cooperative cellular networks based on double auction, IEEE Transactions on Wireless Communications 14 (8) (2015) 4093–4104. doi:10.1109/TWC.2015.2416715.
- [33] J. M. Marais, R. Malekian, A. M. Abu-Mahfouz, LoRa and LoRaWAN testbeds: A review, 2017 Ieee Africon (2017) 1496–1501.
- [34] V. Krishna, Auction theory, Academic press, 2009.
- [35] H. W. Kuhn, The Hungarian method for the assignment problem, Naval research logistics quarterly 2 (1-2) (1955) 83–97.
- [36] B. H. Korte, J. Vygen, B. Korte, J. Vygen, Combinatorial optimization, Vol. 1, Springer, 2011, Ch. The assignment problem, pp. 278–283.
- [37] A. Strzoda, K. Grochla, A Nature-Inspired Approach to Energy-Efficient Relay Selection in Low-Power Wide-Area Networks (LPWAN), Sensors 24 (11). doi:10.3390/s24113348. URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/11/3348>
- [38] K. Grochla, A. Strzoda, R. Marjasz, P. Głomb, K. Książek, Z. Łaskarzewski, Energy-Aware Algorithm for Assignment of Relays in LP WAN, ACM Trans. Sen. Netw. 18 (4). doi:10.1145/3544561. URL <https://doi.org/10.1145/3544561>
- [39] A. Strzoda, K. Grochla, A. Frankiewicz, Z. Łaskarzewski, Measurements and Analysis of Large Scale LoRa Network Efficiency, in: 2022 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC), 2022, pp. 818–823. doi:10.1109/IWCMC55113.2022.9824317.
- [40] A. Strzoda, R. Marjasz, K. Grochla, How Accurate is LoRa Positioning in Realistic Conditions?, in: Proceedings of the 12th ACM International Symposium on Design and Analysis of Intelligent Vehicular Networks and Applications, DIVANet '22, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2022, p. 31–35. doi:10.1145/3551662.3561260.
- [41] A. Strzoda, K. Grochla, P. Głomb, A. Madej, Link failure prediction in LoRa networks, in: 2023 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC), 2023, pp. 1310–1315. doi:10.1109/IWCMC58020.2023.10183185.
- [42] A. Strzoda, R. Marjasz, K. Grochla, LoRa Positioning in Verification of Location Data’s Credibility, Infocommunications Journal 14 (4) (2022) 56–61.



- [43] R. Marjasz, A. Strzoda, K. Połys, K. Grochla, Mitigation of LoRa Interferences via Dynamic Channel Weights, in: Proceedings of the 35th annual European Simulation and Modelling Conference *ESM 2021*, 2021, pp. 150–154.
- [44] R. Marjasz, K. Połys, A. Strzoda, K. Grochla, Improving Delivery Ratio in LoRa Network, in: Proceedings of the 19th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access, *MobiWac '21*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2021, p. 141–146. doi:10.1145/3479241.3486698.
- [45] A. Strzoda, K. Grochla, K. Połys, Variability of BLE Advertisement Packets Received Signal Strength and Delivery Probability in the Presence of Interferences, in: Proceedings of the 12th ACM International Symposium on Design and Analysis of Intelligent Vehicular Networks and Applications, 2022, pp. 37–44.
- [46] R. Marjasz, K. Grochla, A. Strzoda, Z. Łaskarzewski, Simulation Analysis of Packet Delivery Probability in LoRa Networks, in: Computer Networks: 26th International Conference, *CN 2019*, Kamień Śląski, Poland, June 25–27, 2019, Proceedings 26, Springer, 2019, pp. 86–98.
- [47] A. Strzoda, Zastosowanie heurystyki do wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieciach LP WAN, *Przegląd Telekomunikacyjny+ Wiadomości Telekomunikacyjne*.
- [48] K. Grochla, R. Marjasz, K. Połys, A. Strzoda, Kolidacje pakietów w Sieciach LoRa w Zastosowaniach Smart City, *Przegląd Telekomunikacyjny+ Wiadomości Telekomunikacyjne*.
- [49] L. Vangelista, Frequency shift chirp modulation: The LoRa modulation, *IEEE signal processing letters* 24 (12) (2017) 1818–1821.
- [50] The Things Network Global Team, LoRaWAN® distance world record broken, twice, <https://www.thethingsnetwork.org>, [Dostęp: 2020-04-27] (2020).
- [51] M. C. Bor, J. Vidler, U. Roedig, LoRa for the Internet of Things., in: *Ewsn*, Vol. 16, 2016, pp. 361–366.
- [52] A. Zourmand, A. L. K. Hing, C. W. Hung, M. AbdulRehman, Internet of things (IoT) using LoRa technology, in: 2019 IEEE international conference on automatic control and intelligent systems (*I2CACIS*), IEEE, 2019, pp. 324–330.
- [53] R. S. Sinha, Y. Wei, S.-H. Hwang, A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT, *Ict Express* 3 (1) (2017) 14–21.

- [54] W. Gao, W. Du, Z. Zhao, G. Min, M. Singhal, Towards Energy-Fairness in LoRa Networks, in: 2019 IEEE 39th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), 2019, pp. 788–798. doi: 10.1109/ICDCS.2019.00083.
- [55] N. Sornin, M. Luis, T. Eirich, T. Kramp, O. Hersent, LoRaWAN specification, LoRa alliance.
- [56] G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, A. Passarella, Energy conservation in wireless sensor networks: A survey, *Ad hoc networks* 7 (3) (2009) 537–568.
- [57] M. Saelens, J. Hoebeke, A. Shahid, E. D. Poorter, Impact of EU duty cycle and transmission power limitations for sub-GHz LPWAN SRDs: An overview and future challenges, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2019 (1) (2019) 1–32.
- [58] ETSI EN 300 220-2 V3.2.1 (2018-06), Harmonised European Standard, short Range Devices (SRD) operating in the frequency range 25 MHz to 1 000 MHz; Part 2: Harmonised Standard for access to radio spectrum for non specific radio equipment (2018).
- [59] R. Sobot, *Wireless Communication Electronics: Introduction to RF Circuits and Design Techniques*, Springer International Publishing, 2020. URL <https://books.google.pl/books?id=pdX-DwAAQBAJ>
- [60] B. A. Forouzan, *Data communications and networking*, Huga Media, 2007.
- [61] B. A. Forouzan, *Data communications and networking*, Huga Media, 2007.
- [62] S. Sharma, D. Kumar, K. Kishore, Wireless sensor networks-a review on topologies and node architecture, *International Journal of Computer Sciences and Engineering* 1 (2) (2013) 19–25.
- [63] LoRa Alliance, LoRaWAN Regional Parameters RP002-1.0.4, [Dostęp: 2024-02-12].  
URL <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp002-1-0-4-regional-parameters>
- [64] J. Wieselthier, A. Ephremides, L. Michaels, An exact analysis and performance evaluation of framed ALOHA with capture, *IEEE Transactions on Communications* 37 (2) (1989) 125–137. doi:10.1109/26.20080.
- [65] LoRa Alliance, TR013-1-0-0 CSMA Technical Recommendations, <https://resources.lora-alliance.org/>

- technical-recommendations/tr013-1-0-0-csma, [Dostęp: 2024-07-04].
- [66] S. Corporation, SX1272/3/6/7/8: LoRa Modem Designer's Guide AN1200.13, [Dostęp: 06.08.2019].
- [67] A. Sanfratello, E. Mingozzi, F. Marcelloni, Enabling relay-based communication in LoRa networks for the Internet of Things: design implementation and experimental evaluation, Pisa, Italy.
- [68] C.-H. Liao, G. Zhu, D. Kuwabara, M. Suzuki, H. Morikawa, Multi-Hop LoRa networks enabled by concurrent transmission, *IEEE Access* 5 (2017) 21430–21446. doi:10.1109/ACCESS.2017.2755858.
- [69] S. S. Borkotoky, P. D. Abbineni, V. Chaubey, S. Rathi, Coded Relaying in LoRa Sensor Networks, in: 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2021, pp. 1–6. doi:10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685787.
- [70] P. Branch, T. Cricenti, A LoRa Based Wireless Relay Network for Actuator Data, in: 2020 International Conference on Information Networking (ICOIN), IEEE, 2020, pp. 190–195. doi:10.1109/ICOIN48656.2020.9016483.
- [71] K. Mikhaylov, J. Petäjäjärvi, J. Haapola, A. Pouttu, D2D communications in LoRaWAN Low Power Wide Area Network: From idea to empirical validation, in: 2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), IEEE, 2017, pp. 737–742.
- [72] V. Petrov, A. Samuylov, V. Begishev, D. Moltchanov, S. Andreev, K. Samouylov, Y. Koucheryavy, Vehicle-based relay assistance for opportunistic crowdsensing over narrowband IoT (NB-IoT), *IEEE Internet of Things Journal* 5 (5) (2017) 3710–3723. doi:10.1109/JIOT.2017.2670363.
- [73] M. R. Palattella, N. Accettura, Enabling Internet of Everything Everywhere: LPWAN with Satellite Backhaul, in: 2018 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS), IEEE, 2018, pp. 1–5. doi:10.1109/GIIS.2018.8635663.
- [74] S. Lee, J. Lee, H.-S. Park, J. K. Choi, A Novel Fair and Scalable Relay Control Scheme for Internet of Things in LoRa-Based Low-Power Wide-Area Networks, *IEEE Internet of Things Journal* doi:10.1109/JIOT.2020.3034185.
- [75] Network simulator, [Dostęp: 2023-07-10] (2008). URL <https://www.nsnam.org/>

- [76] E. Sisinni, D. F. Carvalho, P. Ferrari, A. Flammini, D. R. C. Silva, I. M. D. Da Silva, Enhanced flexible LoRaWAN node for industrial IoT, in: 2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS), 2018, pp. 1–4. doi:10.1109/WFCS.2018.8402367.
- [77] S. S. Borkotoky, U. Schilcher, C. Bettstetter, Cooperative Relaying in LoRa Sensor Networks, in: 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2019, pp. 1–5. doi:10.1109/GLOBECOM38437.2019.9014071.
- [78] K. P. Naveen, A. Kumar, Relay Selection with Channel Probing in Sleep-Wake Cycling Wireless Sensor Networks, *ACM Trans. Sen. Netw.* 11 (3). doi:10.1145/2757280.  
URL <https://doi.org/10.1145/2757280>
- [79] Seunghoon Nam, Mai Vu, V. Tarokh, Relay selection methods for wireless cooperative communications, in: 2008 42nd Annual Conference on Information Sciences and Systems, 2008, pp. 859–864. doi:10.1109/CISS.2008.4558640.
- [80] J. Cai, X. Shen, J. W. Mark, A. S. Alfa, Semi-Distributed User Relaying Algorithm for Amplify-and-Forward Wireless Relay Networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications* 7 (4) (2008) 1348–1357. doi:10.1109/TWC.2008.060909.
- [81] V. Singh, R. Kumar, Z. Wei, Adaptive time-switching and power-splitting protocols for energy harvesting sensor networks with multiple relays, *Computer Networks* 179 (2020) 107341. doi:<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107341>.
- [82] T. N. Nguyen, P. T. Tran, M. Voznak, Wireless energy harvesting meets receiver diversity: A successful approach for two-way half-duplex relay networks over block rayleigh fading channel, *Computer Networks* 172 (2020) 107176. doi:<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107176>.
- [83] Z. Liu, C. Liang, Y. Yuan, X. Guan, Energy efficient resource allocation based on relay selection and subcarrier pairing with channel uncertainty in cognitive radio network, *Computer Networks* 161 (2019) 82–92. doi:<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.05.021>.
- [84] H. Yin, S. Alamouti, OFDMA: A Broadband Wireless Access Technology, in: 2006 IEEE Sarnoff Symposium, 2006, pp. 1–4. doi:10.1109/SARNOF.2006.4534773.
- [85] D. Kivanc, H. Liu, Subcarrier allocation and power control for OFDMA, in: Conference Record of the Thirty-Fourth Asilomar Conference on

- Signals, Systems and Computers (Cat. No. 00CH37154), Vol. 1, IEEE, 2000, pp. 147–151.
- [86] W. Dinkelbach, On nonlinear fractional programming, *Management science* 13 (7) (1967) 492–498.
- [87] M. Asshad, S. A. Khan, A. Kavak, K. Küçük, D. L. Msongaleli, Cooperative communications using relay nodes for next-generation wireless networks with optimal selection techniques: A review, *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering* 14 (5) (2019) 658–669. doi:10.1002/tee.22852.
- [88] B. Ma, H. Shah-Mansouri, V. W. S. Wong, A matching approach for power efficient relay selection in full duplex D2D networks, in: 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2016, pp. 1–6. doi:10.1109/ICC.2016.7511462.
- [89] M. N. Ochoa, A. Guizar, M. Maman, A. Duda, Evaluating LoRa Energy Efficiency for Adaptive Networks: From Star to Mesh Topologies, in: 2017 IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), IEEE, 2017, pp. 1–8. doi:10.1109/WiMOB.2017.8115793.
- [90] L.-H. Hsu, C.-K. Lin, *Graph theory and interconnection networks*, CRC press, 2008.
- [91] B. H. Korte, J. Vygen, B. Korte, J. Vygen, *Combinatorial optimization*, Vol. 1, Springer, 2011.
- [92] D. B. West, et al., *Introduction to graph theory*, Vol. 2, Prentice hall Upper Saddle River, 2001.
- [93] National Geospatial-Intelligence Agency, Office of Geomatics, Arnold, MO, *World Geodetic System 1984: Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems*, version 1.0.0 (July 2014).
- [94] V. Erceg, L. J. Greenstein, S. Y. Tjandra, S. R. Parkoff, A. Gupta, B. Kulic, A. A. Julius, R. Bianchi, An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 17 (7) (1999) 1205–1211. doi:10.1109/49.778178.
- [95] S. Van Huffel, H. Zha, 10 the total least squares problem.
- [96] A. Mohamed, S. Axel, Free space range measurements with semtech LoRaTM technology, in: *Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS-SWS)*, 2014 2nd International Symposium, 2014, pp. 19–23.

- [97] M. J. Faber, K. M. van der Zwaag, W. G. V. dos Santos, H. R. d. O. Rocha, M. E. Segatto, J. A. Silva, A theoretical and experimental evaluation on the performance of LoRa technology, *IEEE Sensors Journal* 20 (16) (2020) 9480–9489.
- [98] The Things Network, RSSI and SNR, [Dostęp: 2024-07-30] (2024).  
URL <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/rssi-and-snr/>
- [99] T. Petrić, M. Goessens, L. Nuaymi, L. Toutain, A. Pelov, Measurements, performance and analysis of LoRa FABIAN, a real-world implementation of LPWAN, in: 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2016, pp. 1–7. doi:10.1109/PIMRC.2016.7794569.
- [100] N. Jeftenić, M. Simić, Z. Stamenković, Impact of Environmental Parameters on SNR and RSSI in LoRaWAN, in: 2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE), 2020, pp. 1–6. doi:10.1109/ICECCE49384.2020.9179250.
- [101] A. J. Wixted, P. Kinnaird, H. Larijani, A. Tait, A. Ahmadinia, N. Strachan, Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks, in: 2016 IEEE SENSORS, IEEE, 2016, pp. 1–3.
- [102] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, W. M. Townsley, A study of LoRa: Long range & low power networks for the Internet of Things, *Sensors* 16 (9) (2016) 1466.
- [103] M. Aernouts, R. Berkvens, K. Van Vlaenderen, M. Weyn, Sigfox and LoRaWAN Datasets for Fingerprint Localization in Large Urban and Rural Areas, *Data* 3 (2). doi:10.3390/data3020013.  
URL <https://www.mdpi.com/2306-5729/3/2/13>
- [104] L. Bhatia, M. Breza, R. Marfievici, J. A. McCann, Dataset: LoED: The LoRaWAN at the edge dataset, arXiv preprint arXiv:2010.14211.
- [105] A. Varga, R. Hornig, An overview of the OMNeT++ simulation environment, in: 1st International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems, 2010.
- [106] OMNeT++ Discrete Event Simulator – Home, [Dostęp: 2023-02-12].  
URL <https://omnetpp.org/>
- [107] R. Marjasz, K. Grochla, A. Strzoda, Z. Łaskarzewski, Simulation analysis of packet delivery probability in LoRa networks, in: P. Gaj, M. Sawicki, A. Kwiecień (Eds.), *Computer Networks*, Springer International Publishing, 2019, pp. 86–98. doi:10.1007/978-3-030-21952-9\_7.

- [108] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski, Simulations of the MAC Layer in the LoRaWAN Networks, *Journal of Telecommunications and Information Technology*.
- [109] J. E. Wieselthier, A. Ephremides, L. A. Michaels, An exact analysis and performance evaluation of framed ALOHA with capture, *IEEE Transactions on Communications* 37 (2) (1989) 125–137. doi:10.1109/26.20080.
- [110] S. M. Ross, *Introduction to probability models*, Academic press, 2014, Ch. The Unifrom Random Variable, pp. 31–32.
- [111] L. Casals, B. Mir, R. Vidal, C. Gomez, Modeling the energy performance of LoRaWAN, *Sensors* 17 (10) (2017) 2364.
- [112] J. A. Bondy, U. S. R. Murty, *Graph theory*, Springer Publishing Company, Incorporated, 2008.
- [113] J. Munkres, Algorithms for the assignment and transportation problems, *Journal of the society for industrial and applied mathematics* 5 (1) (1957) 32–38.
- [114] Z. Galil, Efficient algorithms for finding maximum matching in graphs, *ACM Computing Surveys (CSUR)* 18 (1) (1986) 23–38.
- [115] M. Dorigo, M. Birattari, T. Stutzle, Ant colony optimization, *IEEE Computational Intelligence Magazine* 1 (4) (2006) 28–39. doi:10.1109/MCI.2006.329691.
- [116] J. A. Bondy, U. S. R. Murty, *Graph theory*, Springer Publishing Company, Incorporated, 2008, Ch. Graphs, pp. 4–6.
- [117] B. Clapper, Munkres algorithm package for python, <https://pypi.org/project/munkres/>, [Dostęp: 2023-08-01] (2023).
- [118] K. Boothby, D. Schult, A. Hagbergd, J. Millman, M. Seth, Networkx reference: max\_weight\_matching, [https://networkx.org/documentation/stable/reference/algorithms/generated/networkx.algorithms.matching.max\\_weight\\_matching.html](https://networkx.org/documentation/stable/reference/algorithms/generated/networkx.algorithms.matching.max_weight_matching.html), [Dostęp: 2024-07-03] (2022).
- [119] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, C. Stein, *Introduction to algorithms*, MIT press, 2022, Ch. Characterizing Running Times, pp. 49–75.
- [120] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, C. Stein, *Introduction to algorithms*, MIT press, 2022.

- [121] W. Gao, W. Du, Z. Zhao, G. Min, M. Singhal, Towards Energy-Fairness in LoRa Networks, in: 2019 IEEE 39th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), 2019, pp. 788–798. doi: 10.1109/ICDCS.2019.00083.
- [122] F. Wilcoxon, Individual comparisons by ranking methods, in: Breakthroughs in statistics: Methodology and distribution, Springer, 1992, pp. 196–202.



# Spis rysunków

2.1	Rysunek poglądowy ilustrujący ideę zastosowania urządzenia relay w celu utrzymania łączności z siecią urządzenia końcowego o słabej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym, zainstalowanego w studzience wodomierzowej [15]. . . . .	21
3.1	Prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu w zależności od lokalizacji urządzenia końcowego sieci dla rzeczywistych wdrożeń IoT sieci A i B. . . . .	33
3.2	Rozkłady prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu dla rzeczywistych wdrożeń IoT sieci A i B. . . . .	34
3.3	Rozkład prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu w zależności od odległości pomiędzy urządzeniem końcowym sieci a bramą LoRa dla rzeczywistego wdrożenia IoT sieci A. Szerokość kubelków $0.05 \text{ km} \times 0.02$ . . . . .	35
3.3	Rozkład prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu w zależności od odległości pomiędzy urządzeniem końcowym sieci a bramą LoRa dla rzeczywistego wdrożenia IoT sieci B. Szerokość kubelków $0.05 \text{ km} \times 0.02$ . Kontynuacja rysunku. . . . .	36
3.4	Liczba dostarczonych pakietów na dobę z pojedynczego urządzenia końcowego sieci. Scenariusz częstych krótkotrwałych przerw w łączności urządzenia z siecią. . . . .	37
3.5	Liczba dostarczonych pakietów na dobę z pojedynczego urządzenia końcowego sieci. Scenariusz rzadkich długotrwałych przerw w łączności urządzenia z siecią. . . . .	38
3.6	Liczba dostarczonych pakietów na dobę z pojedynczego urządzenia końcowego sieci. Scenariusz rzadkich krótkotrwałych przerw w łączności urządzenia z siecią. . . . .	38
3.7	Fragment obszaru sieci A. . . . .	39
3.8	Fragment obszaru sieci B. . . . .	39
3.9	Fragment obszaru sieci A. Przypadek gęstego rozmieszczenia bram LoRa w wybranym obszarze sieci (średnia odległość między nimi wynosi $1 \pm 0.4 \text{ km}$ ). . . . .	41
3.10	Fragment obszaru sieci B. Przypadek gęstego rozmieszczenia bram LoRa w wybranym obszarze sieci (średnia odległość między nimi wynosi $1 \pm 0.3 \text{ km}$ ). . . . .	41

3.11	Wykresy pudełkowe odległości pomiędzy punktem dostępowym a węzłem o ograniczonej bezpośredniej łączności z w siecią. . .	42
3.12	Rozkład liczby (%) urządzeń końcowych sieci w zależności od średniej wartości wskaźnika SNR i odległości pomiędzy urządzeniem końcowym sieci a bramą LoRa dla rzeczywistych wdrożeń IoT sieci A i B. Szerokość kulek wynosi $1 \text{ dB} \times 0.05 \text{ km}$ . . . . .	43
3.13	Rozkłady wartości odchylenia standardowego wskaźnika SNR [dB] urządzeń końcowych sieci dla rzeczywistych wdrożeń IoT sieci A i B. . . . .	44
4.1	Diagram przejścia stanów punktu dostępowego AP w rozważanym modelu symulacyjnym. Podobny schemat realizowany jest dla modułu RP. . . . .	50
4.2	Mapy ilustrujące rozmieszczenie węzłów sieci w topologiach sieci rzeczywistego wdrożenia IoT: T i P. . . . .	56
4.3	Rysunki poglądowe ilustrujące wynik zaproponowanego algorytmu wyboru lokalizacji węzłów relay w przykładowych scenariuszach topologii sieci (szczegółowy opis algorytmu przedstawiono w rozdziale 6). Na rysunku uwzględniono mapy przykładowych topologii sieci o losowym rozmieszczeniu węzłów R(1000) – (a) i R(1500) – (b) oraz dwóch topologii sieci rzeczywistego wdrożenia P – (c) (złożona z dwóch oddzielnych regionów) i T – (d). . . . .	58
5.1	Rozkład wartości funkcji wagi krawędzi $\eta$ (5.6) w zależności od wartości współczynników rozpraszania w komunikacji pomiędzy węzłem $w \in W$ o ograniczonej łączności z siecią a potencjalnym węzłem relay $v \in P_R (SF_{wv})$ oraz pomiędzy węzłem $v$ a punktem dostępowym ( $SF_{vgv}$ ). . . . .	67
5.2	Średnia wartość i odchylenie standardowe jakości (5.13) rozwiązań znalezionych przez wszystkie mrówki w kolejnych iteracjach algorytmu ACO dla włączonej (wykres 5.2a) i wyłączonej (wykres 5.2b) funkcji odkładania feromonu (5.11) na podstawie 5.12. Przypadek testowy grafu pełnego $G_H$ , gdzie $ W  =  P_R  = 100$ oraz przykładowych wartości parametrów metody heurystycznej ACO. Zestawienie ukazuje wpływ zaproponowanej strategii odkładania feromonu na skuteczność heurystyki w znajdowaniu coraz lepszych rozwiązań w kolejnych iteracjach. . . . .	72
5.3	Diagram ilustrujący schemat działania algorytmu wyboru lokalizacji węzłów relay z wykorzystaniem podejścia heurystycznego ACO. . . . .	73

5.4	Rozkład średniej wartości jakości rozwiązania (5.13) heurystyki ACO w zależności od gęstości $D$ grafu potencjalnych węzłów relay $G_H = (V_H, E_H, \eta)$ , gdzie $V_H = W \cup P_R$ i $ W  =  P_R  = 100$ oraz wartości parametrów heurystyki $\alpha$ i $\beta$ . Uwzględniono grafy o gęstości $D \in \{5\%, 10\%, 50\%, 100\%\}$ . . . . .	75
5.5	Średnia wartość i odchylenie standardowe jakości (5.13) najlepszego rozwiązania w kolejnych iteracjach algorytmu ACO dla populacji trzydziestu losowych grafów testowych w obrębie pojedynczego scenariusza testowego. . . . .	76
5.6	Histogramy średniej wartości dziennego poziomu zużycia energii w różnych scenariuszach testowych dla zaproponowanej metody ACO* oraz metody referencyjnej [32]. Informacje te pochodzą z symulacji i można je wykorzystać do sprawdzenia prawdopodobieństwa większego lub mniejszego zużycia energii w sieci. . . . .	83
5.7	Wykresy rozproszenia średniej wartości dziennego poziomu zużycia energii w różnych scenariuszach testowych. Każdy wykres przedstawia wynik dla jednego scenariusza, przy czym każdy punkt odpowiada jednemu przebiegowi symulacji. Każdy przebieg opisany jest parą wartości: kosztem (średni dzienny poziom zużycia energii) dla zaproponowanej metody ACO* i metody referencyjnej [32]. . . . .	84
5.8	Zmiana poziomu naładowania baterii urządzenia w trakcie symulowanego okresu działania sieci równego 10 lat. Każda krzywa odpowiada przebiegowi zużycia energii pojedynczego węzła sieci. Kolorem czarnym wyszczególniono węzły działające w trybie relay wskazane przez metody wyboru lokalizacji węzłów relay (a) ACO*; (b) MK*; (c) ED*; (d) referencyjną [32]. . . . .	88
5.9	Rysunek ilustrujący powiększenie fragmentu z rysunku 5.8d uwzględniającego zmianę poziomu naładowania baterii w czasie dla urządzenia w węźle sieci wskazanym przez metodę referencyjną do działania w trybie relay, którego bateria uległa wyczerpaniu. . . . .	88
6.1	Schemat blokowy algorytmu (obejmującego algorytmy 3, 4) wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa. . . .	101
6.2	Histogramy średniego dziennego zużycia energii osiąganego zaproponowanym algorytmem zachłannym w wybranych scenariuszach testowych. . . . .	105
6.3	Histogramy porównawcze średniego dziennego zużycia energii dla algorytmu referencyjnego [32]. . . . .	105
6.3	Histogramy porównawcze średniego dziennego zużycia energii dla algorytmu referencyjnego [32] – kontynuacja rysunku. . . .	106

- 6.4 Histogramy średniej wartości dziennego poziomu zaoszczędzonej energii osiągniętej proponowaną metodą zachłanną dla wybranych scenariuszy testowych – kontynuacja rysunku. . . . . 107
- 6.5 Wykresy rozproszenia średniego dziennego zużycia energii w wybranych scenariuszach testowych. Każdy wykres przedstawia wynik dla jednego scenariusza. Każdy punkt na wykresie opisany jest parą wartości: kosztem (średnie dzienne zużycie energii (mAs)) dla proponowanej metody i metody referencyjnej [32]. . . . . 108
- 6.6 Zmiana poziomu naładowania baterii urządzeń relay w symulowanym okresie działania sieci w scenariuszu stabilnej propagacji sygnału radiowego dla przebiegu symulacji w scenariuszu testowym T(2.5%). Każda krzywa na rysunku odpowiada dokładnie jednemu urządzeniu relay z wynikowego zestawu węzłów sieci wskazanych do działania w tym trybie przez zaproponowany algorytm zachłanny. . . . . 111
- 6.7 Zmiana poziomu naładowania baterii w czasie dla urządzeń relay w okresie działania sieci w scenariuszu z pogorszeniem warunków propagacji sygnału radiowego między 23. a 60. miesiącem dla przebiegu symulacji w scenariuszu testowym T(2.5%). Każda krzywa na wykresie odpowiada dokładnie jednemu węzłowi relay z wynikowego zestawu węzłów wskazanych do działania w tym trybie przez zaproponowany algorytm zachłanny. 112
- 6.8 Rysunek pomocniczy ilustrujący powiększenie wybranego fragmentu z rysunku 6.7 z widocznymi przypadkami węzłów wyłączonych z działania w trybie relay w 36., 37., 39., 40. i 41. miesiącu. W miesiącach tych, dla niektórych węzłów relay, widoczna jest redukcja w tempie zużycia energii spowodowana zakończeniem pełnienia funkcji związanej z utrzymaniem łączności dla przypisanych mu wcześniej węzłów o ograniczonej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym. . . . . 112
- 6.9 Zmiana poziomu naładowania baterii urządzeń działających w trybie relay w scenariuszu P(5%) w symulowanym okresie działania sieci równym 10 lat. Scenariusz uwzględnia wyjście części urządzeń sieci z działania w trybie relay w 20. miesiącu okresu operacyjnego sieci oraz realizację ich funkcji przez inne urządzenia relay wskazane przez metodę 7 dla współczynnika redundancji  $k = 2$ . Każda krzywa na wykresie odpowiada dokładnie jednemu urządzeniu relay. . . . . 117

- 6.10 Zmiana poziomu naładowania baterii urządzeń działających w trybie relay w symulowanym okresie działania sieci równym 10 lat w scenariuszu P(5%). Eksperyment uwzględnia wyjście części urządzeń z działania w trybie relay na okres przypadający pomiędzy 20. a 60. miesiącem symulowanego czasu działania sieci oraz pełnienie ich funkcji w tym czasie przez inne urządzenia relay wskazane przez metodę 7 dla współczynnika redundancji  $k = 2$ . Każda krzywa na rysunku odpowiada dokładnie jednemu urządzeniu relay. . . . . 118

# Spis tablic

2.1	Poziom zużycia energii na transmisję oraz nasłuch dla pojedynczego pakietu w zależności od wartości współczynnika SF i dla wartości parametrów podanych w modelu zużycia energii	
2.2.	.....	20
3.1	Informacje dotyczące zbiorów danych pochodzących z rzeczywistych wdrożeń IoT sieci A i B. ....	31
5.1	Średnia wartość czasu CPU (w sekundach) znalezienia przez algorytm rozwiązania o danej średniej jakości (%) dla każdej z metod ACO, MK, ED dla przypadków testowych grafów $G_{H_1}, G_{H_2}, G_{H_3}, G_{H_4}$ . Wartości liczbowe występujące po znaku „±” to wartości odchylenia standardowego. ....	77
5.2	Koszt i krotność wykonania istotnych w sensie złożoności obliczeniowej instrukcji algorytmu 1. ....	79
5.3	Koszt i krotność wykonania istotnych w sensie złożoności obliczeniowej instrukcji algorytmu 2 w pętli „while” 4. ....	79
5.4	Złożoność obliczeniowa metod heurystycznej ACO oraz dokładnych MK [113] i ED [114]. $V_H = W \cup P_R$ . ....	80
5.5	Średnia wartość i odchylenie standardowe dziennego poziomu zużycia energii (mAs) w całej sieci po upływie symulowanego czasu działania sieci równego 10 lat w różnych scenariuszach testowych dla metod wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących: ACO*, MK*, ED* i metody referencyjnej [32]. ....	82
5.6	Średnia wartość i odchylenie standardowe czasu CPU (w sekundach) działania różnych metod wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących: ACO*, MK*, ED* oraz metody referencyjnej [32] w różnych scenariuszach testowych. ....	85
6.1	Wartości funkcji $f$ (6.2) dla przykładowych wartości parametrów.	93
6.2	Koszt i krotność wykonania instrukcji istotnych w kontekście złożoności obliczeniowej algorytmu 4. ....	102

6.3	Średnia wartość i odchylenie standardowe dziennego zużycia energii (mAs) w sieci dla zaproponowanego algorytmu zachłanego oraz algorytmu referencyjnego ([32]) w różnych scenariuszach testowych. . . . .	104
6.4	Średnia wartość i odchylenie standardowe poziomu zaoszczędzonej energii (%) w sieci osiągniętego zaproponowaną metodą zachłaną w różnych scenariuszach testowych. . . . .	109
6.5	Średnia wartość i odchylenie standardowe stosunku liczby węzłów relay wybieranych przez metodę referencyjną [32] do liczby węzłów relay wybieranych przez zaproponowany algorytm zachłanny w różnych scenariuszach testowych. . . . .	109
6.6	Statystyki pozycyjne wartości współczynnika SF dla topologii sieci T oraz P – opartych o dane z rzeczywistych wdrożeń IoT. . . . .	110

# Dodatek

Badania zostały częściowo sfinansowane przez Polskie Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, numer projektu POIR.04.01.04-00-0005/17.

Lista projektów badawczych oraz badawczo-rozwojowych, w których realizację prac byłam zaangażowana w ramach własnej pracy badawczej:

1. „Dynamiczne środowisko komunikacji bezprzewodowej dla infrastruktury internetu rzeczy inteligentnych miast – Smart City IoT”, numer projektu POIR.04.01.04-00-0005/17;
2. „Modelowanie wielkoskalowych sieci Internetu Rzeczy opartych o komunikację radiową niskiej mocy i dużego zasięgu LoRa”, numer projektu BPN/BFR/2022/1/00019;
3. „Ekosystem Intelligence Augmentation dla analityków sieci dystrybucji wody – WaterPrime”, numer projektu POIR.01.01.01-00-1414/20;
4. „Zintegrowany system analizy zagrożeń epidemiologicznych i zarządzania procesami biznesowymi wspomagany technikami lokalizacji personelu i majątku przedsiębiorstwa”, numer projektu POIR.01.01.01-00-2612/20;
5. „HybridMeshMeet: opracowanie hybrydowego systemu wykrywania relacji bliskości opartego na rozproszonej sieci mesh na potrzeby przemysłu spotkań”, numer projektu POIR.01.01.01-00-1261/19;
6. „Niezawodna elektronika dla aktywnych systemów przyszłości” (ReACTIVE Too)”, numer projektu 871163.



# Indeks

- brama – brama LoRa, punkt dostę-  
powy LoRa, 17
- pokrycie (ang. coverage) – objęcie za-  
sięgiem sieci, 8
- RSSI – wskaźnik mocy sygnału ode-  
branego, 16
- SF – współczynnik rozpraszania, 15
- skojarzenie – podzbiór krawędzi grafu,  
które są parami rozłączne, 73
- SNR – stosunek mocy sygnału uży-  
tecznego do mocy szumu tła,  
17
- węzeł końcowy (także urządzenie koń-  
cowe) – urządzenie w sieci, które  
służy jako punkt końcowy ko-  
munikacji, odbierające i wy-  
syłające dane bez uczestnic-  
twa w przekazywaniu ruchu sie-  
ciowego między innymi węzłami,  
6
- węzeł pośredniczący – węzeł relay, 7