

UNIwersytet Śląski  
Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych  
Instytut Informatyki

Rozprawa doktorska

mgr Marcin Lewandowski

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

Promotor: dr hab. inż. Bartłomiej Płaczek, prof. UŚ

Promotor pomocniczy: dr inż. Tomasz Orczyk

Sosnowiec, 2024

*Soni, Rodzinie oraz Promotorowi w podziękowaniu za troskę,  
wrozumiałość oraz towarzyszenie mi w odkrywaniu świata.*

# Spis treści

<b>1</b>	<b>Wprowadzenie</b>	<b>1</b>
1.1	Problem czasu życia sieci sensorowej . . . . .	7
1.2	Przegląd technologii sieci sensorowych . . . . .	8
1.3	Zastosowania sieci sensorowych . . . . .	10
1.4	Motywacja pracy . . . . .	11
1.5	Cele pracy . . . . .	12
1.6	Teza pracy . . . . .	13
1.7	Zawartość pracy . . . . .	14
<b>2</b>	<b>Przegląd metod wydłużania czasu życia sieci sensorowej</b>	<b>15</b>
2.1	Przydzielanie zasobów przy uwzględnieniu wielowarstwowego modelu sieci . . . . .	15
2.2	Pozyskiwanie energii . . . . .	17
2.3	Metody bazujące na kształtowaniu wiązki . . . . .	19
2.4	Metody redukcji transmisji danych . . . . .	20
2.4.1	Agregacja danych . . . . .	21
2.4.2	Kompresja danych . . . . .	22
2.4.3	Próbkowanie adaptacyjne . . . . .	23
2.4.4	Predykcja danych . . . . .	24
2.4.5	Optymalizacja rozmieszczenia węzłów sensorowych . . . . .	25
2.5	Klasteryzacja oraz zmiana roli węzła . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Istniejące algorytmy wyboru węzła nadrzędnego</b>	<b>29</b>
3.1	Zmiana węzła nadrzędnego na podstawie upływu czasu . . . . .	30
3.2	Zmiana węzła nadrzędnego na podstawie zużycia energii . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Proponowane algorytmy</b>	<b>34</b>
4.1	Wydłużanie czasu do rozładowania jednego węzła . . . . .	34

4.2	Wydłużanie czasu do rozładowania wszystkich węzłów . . . . .	38
4.3	Złożoność obliczeniowa proponowanych algorytmów . . . . .	41
<b>5</b>	<b>Model bezprzewodowej sieci sensorowej</b>	<b>46</b>
5.1	Inicjalizacja i praca węzłów sensorowych . . . . .	46
5.2	Selekcja węzła nadrzędnego . . . . .	51
5.3	Wyznaczanie czasu życia sieci sensorowej . . . . .	58
<b>6</b>	<b>Eksperymenty i dyskusja wyników</b>	<b>61</b>
6.1	Parametry zużycia energii dla sieci ZigBee . . . . .	61
6.2	Parametry zużycia energii dla sieci LoRaWAN . . . . .	64
6.3	Czas do rozładowania jednego węzła . . . . .	67
6.4	Czas do rozładowania wszystkich węzłów . . . . .	90
<b>7</b>	<b>Podsumowanie</b>	<b>105</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>106</b>



# Rozdział 1

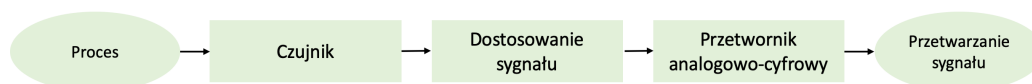
## Wprowadzenie

Bezprzewodowe sieci sensorowe (ang. *wireless sensor networks*) umożliwiają zbieranie danych za pomocą wielu, znajdujących się w różnych lokalizacjach węzłów sensorowych. Gromadzone w ten sposób dane mogą być przetwarzane w celach monitorowania procesów, podejmowania decyzji, rozpoznawania zdarzeń, sterowania i innych. Węzły sensorowe są zwykle zasilane z wbudowanej baterii o ograniczonej pojemności. Z tego powodu operacje realizowane w sieci sensorowej powinny uwzględniać konieczność oszczędnego wykorzystania zasobów energii, dzięki czemu można osiągnąć odpowiednio długi czas pracy węzłów sensorowych.

Rozwój sieci sensorowych zawdzięczamy w głównej mierze coraz nowszym rozwiązaniom sprzętowym i programowym, które wsparte są algorytmami uczenia maszynowego [1], które pozwalają m. in na wykrywanie różnego rodzaju zdarzeń z dużą dokładnością na podstawie gromadzonych danych. Szybkie tempo rozwoju sieci sensorowych nie byłoby możliwe bez opracowania wydajnych mikrokontrolerów, które posiadają sprzętowe wsparcie dla algorytmów uczenia maszynowego czy przetwarzania obrazu. Moduł radiowy, który stanowi nieodzowny element bezprzewodowego węzła sensorowego pozwala na wygodne przesyłanie danych w sieciach sensorowych, które są rozpostarte na rozległych obszarach. Dzięki temu analiza zdarzeń lub procesów zachodzących w otoczeniu sieci sensorowej może się odbywać z uwzględnieniem danych rejestrowanych w wielu różnych lokalizacjach.

Wartym odnotowania jest fakt, że sieci sensorowe są kluczowym elementem Internetu Rzeczy (ang. *Internet of Things*), będąc jednocześnie częścią złożonego ekosystemu pozwalającego na interakcję między światem fizycznym, a systemami informatycznymi [2]. W kontekście Internetu Rzeczy, sieci sensorowe pełnią istotną funkcję dostarczając w czasie rzeczywistym cenne informacje, które wspierają systemy decyzyjne i poprawiają efektywność rozwiązań dotyczących różnych dziedzin życia, od przemysłu po usługi publiczne.

Niezbędnym elementem każdego węzła sensorowego jest czujnik. Węzeł sensorowy może być wyposażony w wiele różnego rodzaju czujników. Czujnik jest rodzajem przetwornika, który przekształca dany rodzaj energii na energię elektryczną. Otrzymywany sygnał elektryczny można następnie przekształcić do postaci cyfrowej. Przykład operacji wykonywanych podczas procesu akwizycji danych z czujnika przedstawiono na rysunku 1.1.



Rys. 1.1: Proces akwizycji danych

Rejestrowane za pomocą czujników sygnały elektryczne zwykle nie są odpowiednie do bezpośredniego przetwarzania na postać cyfrową. Z tego powodu proces akwizycji może obejmować etap wstępnego przetwarzania sygnału. Na tym etapie sygnał podlega wzmocnieniu lub tłumieniu. Celem jest dopasowanie amplitudy sygnału do zakresu napięcia wejściowego przetwornika analogowo-cyfrowego. Dodatkowo, na tym etapie często sygnał poddawany jest filtrowaniu. Pozwala to na usunięcie szumu, który występuje w określonym zakresie częstotliwości. Przykładowo, filtry górnoprzepustowe są używane w celu usunięcia zakłóceń o częstotliwości 50 lub 60 Hz, które pochodzą z linii energetycznych. W kolejnym kroku sygnał analogowy przekształcany jest na postać cyfrową za pomocą przetwornika analogowo-cyfrowego. Na tym etapie otrzymujemy dane cyfrowe, które mogą być dalej przetwarzane lub przesyłane w sieci sensorowej.

Wybór czujników dla węzła sensorowego jest zależny od przeznaczenia sieci sensorowej (np. rodzaju monitorowanego zjawiska). Tabela 1.1 przedstawia kilka powszechnie stosowanych czujników wraz ze wskazaniem wielkości fizycznych, które te czujniki rejestrują. Oprócz rodzaju mierzonej wielkości fizycznej, klasyfikacja czujników może uwzględniać inne kryteria np. wymóg zasilania czujnika z zewnętrznego źródła.

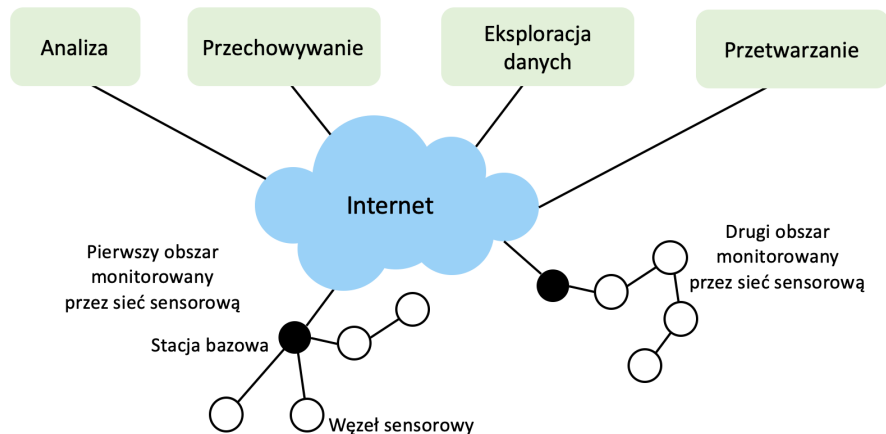
Zastosowanie łączności bezprzewodowej do wymiany danych pomiędzy węzłami sensorowymi i stacją bazową (bramą sieciową) ułatwia budowę sieci sensorowych, które mogą pozyskiwać dane z wielu czujników rozmieszczonych w odległych i trudno dostępnych miejscach. Poza zestawem czujników i modułem radiowym, węzły sensorowe mogą dysponować zasobami, które umożliwiają przetwarzanie i przechowywanie zebranych danych. Pojedynczy węzeł sensorowy często odpowiada nie tylko za proces akwizycji danych, ale także za analizę oraz agregację danych z własnych czujników i z innych węzłów, które tworzą bezprzewodową sieć sensorową.

Tabela 1.1: Klasyfikacja oraz przykłady czujników

Wielkość fizyczna	Przykłady
Temperatura	Termistory i termopary
Ciśnienie	Manometry, barometry, mierniki jonizacji
Światło	Fotodiody, fototranzystory, czujniki podczerwieni, czujniki CCD
Dźwięk	Rezonatory piezoelektryczne, mikrofony
Ruch i wibracje	Akcelerometry, żyroskopy, fotoczuJNIKI
Przepływ	Anemometry
Pozycja	GPS, czujniki ultradźwiękowe, czujniki na podczerwień
Wilgotność	Czujniki pojemnościowe i rezystancyjne, higrometry
Promieniowanie	Detektory jonizacyjne, liczniki Geigera-Muellera

Węzły sensorowe komunikują się nie tylko pomiędzy sobą, ale także ze stacją bazową (ang. *base station*), która pełni rolę bramy sieciowej i umożliwia przesyłanie danych do zdalnych systemów (np. w chmurze obliczeniowej) w celu ich dalszego przetwarzania, wizualizacji, analizy

oraz przechowywania. Na rys. 1.2 przedstawiono przykładową sieć sensorową, która monitoruje dwa odrębne obszary geograficzne. W tej sieci, dane z węzłów sensorowych przekazywane są przez Internet do serwerów aplikacji za pośrednictwem odpowiednich stacji bazowych.



Rys. 1.2: Bezprzewodowa sieć sensorowa

Na etapie projektowania i budowania bezprzewodowych sieci sensorowych napotyka się szereg specyficznych ograniczeń, które nie występują w przypadku tradycyjnych sieci komputerowych. Uwzględnienie tych ograniczeń wymaga opracowania dedykowanych algorytmów transmisji danych.

Głównym ograniczeniem związanym z projektowaniem bezprzewodowych sieci sensorowych jest fakt, że węzły sensorowe mają skończone zasoby energii. Węzły zwykle są zasilane za pomocą baterii. Po wyczerpaniu swoich zasobów energii, węzły muszą zostać wyłączone z sieci. W wielu sytuacjach wymiana lub ładowanie baterii jest trudne w realizacji ze względów praktycznych. W niektórych przypadkach zakłada się, że węzły sensorowe, których bateria uległa rozładowaniu nie będą dalej użytkowane. W związku z powyższym, węzeł sensorowy musi być zdolny do działania aż do planowanego czasu zakończenia swojej pracy lub wymiany baterii. Wymagany czas pracy węzła i całej sieci sensorowej jest zależny od konkretnego zastosowania. Przykładowo, monitorowanie ruchu lodowców wymaga pracy węzłów sensorowych przez wiele lat, podczas gdy dostosowanie algorytmów sterowania ruchem ulicznym można usprawnić poprzez uruchomienie sieci sensorowej na okres kilku dni.

Efektywne wykorzystanie zasobów energii jest jednym z najważniejszych wyzwań dotyczących prac nad bezprzewodowymi sieciami sensorowymi. Wymóg oszczędzania energii dotyczy wszystkich aspektów funkcjonowania węzłów i całej sieci sensorowej. Jednakże największy wpływ na zużycie energii mają operacje związane z transmisją danych [3–5]. Na przykład, w artykule [3] zilustrowano możliwą sekwencję pracy węzła sensorowego i wskazano, że proces przesłania danych przez węzeł obejmuje cztery kosztowne pod względem zużycia energii operacje (wybudzenie modułu nadawczego, przesłanie danych, nasłuchiwanie w celu odbioru ramek od pozostałych aktywnych węzłów oraz usypianie modułu). Pobór energii przez moduł odpowiedzialny za transmisję danych wynika z sumarycznego zużycia energii, który można odnotować

na poszczególnych etapach jego działania i jest znacznie większy niż pobór energii przez mikrokontroler, który nim zarządza [6–8]. W przypadku gdy dane muszą być przesyłane na znaczne odległości, wówczas węzeł sensorowy, aby pokonać bariery związane z dystansem (tłumienie sygnału oraz przeszkody na trasie propagacji) musi zwiększyć moc nadajnika, aby zagwarantować, że uczestniczące w przesyłaniu danych moduły utrzymują łączność, co powoduje jeszcze większe zużycie energii [3].

Dobór odpowiednich protokołów i algorytmów transmisji danych jest istotny dla efektywnego wykorzystania zasobów energii i zapewnienia długiego czasu życia sieci sensorowej. Przykładowo, na zużycie energii mają wpływ protokoły realizowane na warstwie fizycznej i wyższych warstwach modelu referencyjnego OSI, w szczególności na warstwie łącza danych. Podwarstwa kontroli dostępu do medium jest odpowiedzialna za zapewnienie poszczególnym węzłom sensorowym dostępu do bezprzewodowego kanału komunikacyjnego. Niektóre protokoły dostępu do medium są oparte na rywalizacji. W przypadku stosowania takiego protokołu, węzły mogą próbować uzyskać dostęp do medium w dowolnym momencie, co w wielu przypadkach prowadzi do kolizji. Kolizje muszą być rozwiązane przez protokół warstwy MAC (ang. *Media Access Control*) w taki sposób, aby zapewnić, że wszystkie transmisje danych ostatecznie zostaną zakończone sukcesem. Istnieje wiele wad takiego podejścia, do których zalicza się wysokie zużycie energii oraz opóźnienia spowodowane przez występujące kolizje. Ponadto, wspomniane wyżej rozwiązanie powoduje, że węzeł sensorowy musi cały czas aktywnie nasłuchiwać transmisji nadchodzących ze strony innych węzłów, aby mieć pewność, że wszystkie adresowane do niego dane zostaną odebrane. W związku z powyższym, w bezprzewodowych sieciach sensorowych częściej stosowane są protokoły warstwy łącza danych bez rywalizacji, co oznacza, że dostęp do medium danego węzła jest możliwy w ściśle określonym przedziale czasu. Takie podejście pozwala eliminować kolizje i umożliwia wyłączanie modułu radiowego danego węzła w okresach, gdy węzły sąsiednie nie mogą transmitować danych.

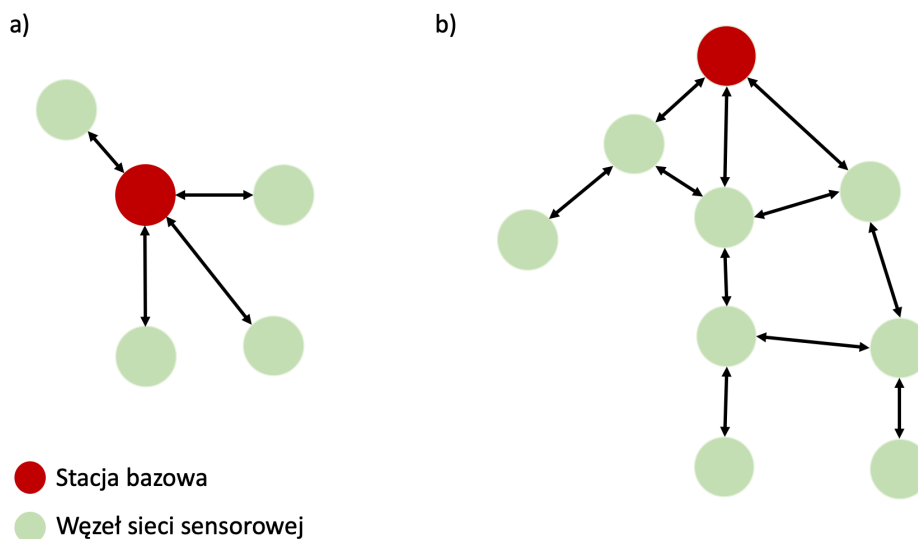
Innym przykładem protokołów, które mają znaczny wpływ na zużycie energii i czas życia sieci sensorowej są protokoły warstwy sieciowej. Są to protokoły routingu, odpowiadające za odnajdywanie trasy prowadzącej od węzła sensorowego do stacji bazowej. Wybór trasy może odbywać się na podstawie typowych metryk, takich jak liczba przeskoków, ale również również z uwzględnieniem ilości energii zużywanej przez węzły na danej trasie lub energii aktualnie dostępnej w węzłach.

Algorytmy transmisji danych w bezprzewodowych sieciach sensorowych powinny również uwzględniać wymagania dotyczące samoorganizacji. Samoorganizacja to cecha, która ułatwia instalację, konfigurację i dostosowanie sieci do zmiennych warunków pracy. Przykładem jest automatyczna zmiana tras transmisji w przypadku awarii części węzłów. W wielu przypadkach sieć sensorowa powinna łączyć węzły, które zostały rozmieszczone w przypadkowych lokalizacjach na obszarze trudno dostępnym dla człowieka. Wówczas istotna jest możliwość automatycznej inicjalizacji pracy węzłów i konfiguracji połączeń pomiędzy nimi.

W przypadku, gdy odległość wszystkich węzłów sensorowych od stacji bazowej nie jest

większa niż zasięg transmisji modułów radiowych, wówczas węzły mogą przesłać dane bezpośrednio stacji bazowej [9, 10]. W takiej sytuacji sieć sensorowa ma topologię gwiazdy. Zastosowanie topologii gwiazdy jest dopuszczalne w przypadku, gdy sieć sensorowa jest rozmieszczona na niewielkim obszarze. Obszar ten jest ograniczony zasięgiem transmisji węzła. Zwiększanie zasięgu transmisji wymaga znacznego nakładu energii. W związku z powyższym, transmisja danych z węzłów sensorowych znajdujących się w dużej odległości od stacji bazowej skutkuje wysokim zużyciem energii oraz krótkim czasem życia.

Sieci sensorowe są zwykle złożone z węzłów rozlokowanych na dużych obszarach. W takich przypadkach konieczność oszczędzania energii sprawia, że lepszym i częściej stosowanym rozwiązaniem niż topologia gwiazdy jest topologia drzewa z komunikacją typu multi-hop. W topologii drzewa poszczególne węzły sensorowe pełnią podwójną rolę - odpowiadają nie tylko za proces akwizycji i transmisji danych z własnych czujników, ale również przekazują dane z innych węzłów w kierunku stacji bazowej. Takie działanie sieci sensorowej wymaga znajomości ścieżki prowadzącej od węzła sensorowego, poprzez węzły pośredniczące, do stacji bazowej i wiąże się z koniecznością zastosowania odpowiedniego protokołu trasowania. Należy zauważyć, że jeden węzeł może pośredniczyć w transmisji danych z wielu innych węzłów sensorowych. W takim przypadku, węzeł pośredniczący agreguje dane przesyłane z wielu źródeł, co pozwala zmniejszyć liczbę transmisji i ograniczyć zużycie energii. Przykładowy schemat obrazujący topologię gwiazdy oraz drzewa przedstawiono na rys. 1.3.

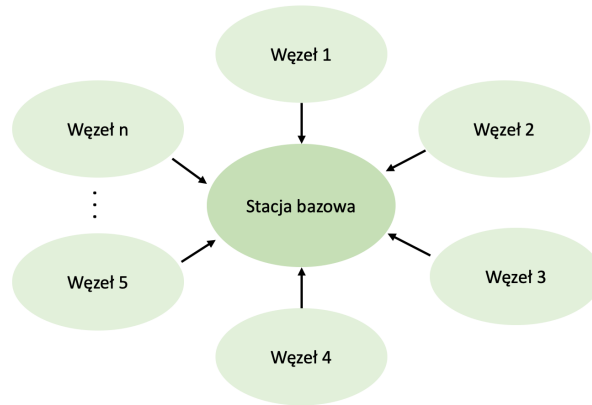


Rys. 1.3: Topologie wykorzystywane w sieciach sensorowych: (a) topologia gwiazdy, (b) topologia drzewa

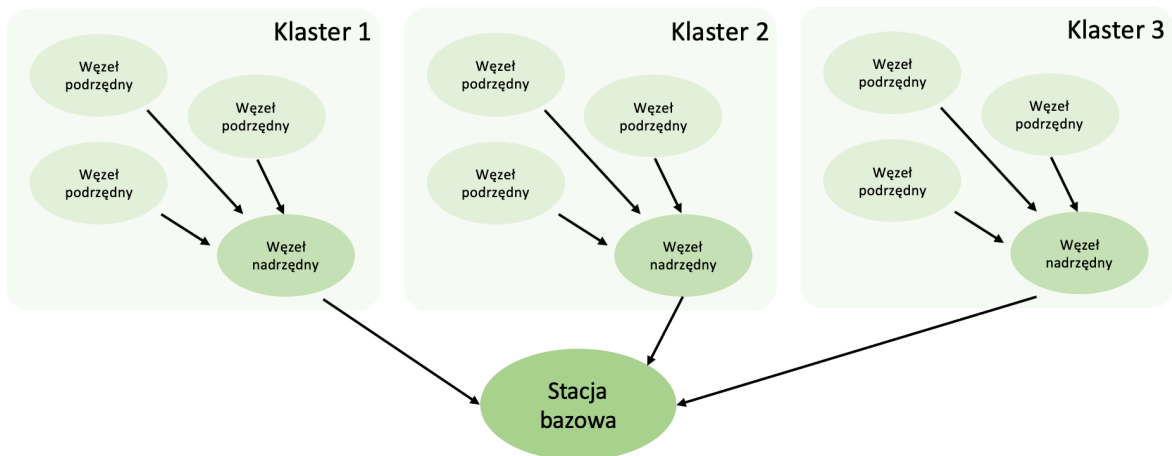
Działanie polegające na przesyłaniu wszystkich rejestrowanych danych do stacji bazowej przez poszczególne węzły sensorowe (rys. 1.4) powodowałoby znaczny ruch w sieci oraz wiązałoby się z wysokim prawdopodobieństwem błędów transmisji, dużą liczbą kolizji, retransmisji i nadmiernym zużyciem energii.

W celu zapewnienia możliwości efektywnego pozyskiwania danych z wielu węzłów senso-

rowych dokonuje się grupowania węzłów w klastry. Klastry mogą być zarządzane niezależnie, co ułatwia optymalizację zasobów w ramach poszczególnych grup węzłów. Warty odnotowania jest fakt, że klasteryzacja przyczynia się do zwiększenia skalowalności sieci. Pozwala na skoncentrowanie się na lokalnej komunikacji w klastrach, a jednocześnie ogranicza przesyłanie danych między nimi, co jest szczególnie ważne w rozległych sieciach sensorowych [11]. Konsekwencją klasteryzacji jest potrzeba wyłonienia dwóch zasadniczych ról: węzła nadrzędnego (ang. *Cluster Head*) oraz węzłów podrzędnych (ang. *Cluster Members*). Węzły podrzędne przesyłają dane do węzła nadrzędnego, który przekazuje zagregowane dane dalej, w kierunku stacji bazowej. Węzeł nadrzędny może również realizować dodatkowe operacje przetwarzania i analizy danych. Ze względu na realizowane zadania, węzeł nadrzędny wyczerpuje swoje zasoby energii szybciej niż węzły podrzędne. W związku z powyższym, rola węzła nadrzędnego musi być okresowo przekazywana pomiędzy węzłami sensorowymi należącymi do klastra w celu osiągnięcia dłuższego czasu życia sieci. Model sieci sensorowej przedstawiono na rys. 1.5.



Rys. 1.4: Uproszczony model przesyłania danych w sieci sensorowej



Rys. 1.5: Model sieci sensorowej

## 1.1 Problem czasu życia sieci sensorowej

Niniejsza praca dotyczy problemu wydłużenia czasu życia bezprzewodowej sieci sensorowej. Należy jednak zauważyć, że czas życia może być definiowany na wiele sposobów. Definicja czasu życia sieci zależy od konkretnego zastosowania, przyjętego celu funkcjonowania oraz rozważanej topologii sieci. Ogólnie można zdefiniować ten parametr jako całkowity czas, w którym sieć jest w stanie utrzymać swoją pełną funkcjonalność lub osiągnąć określone cele swojego działania. Warto podkreślić, że czas życia sieci jest kluczową miarą jakości bezprzewodowej sieci sensorowej, której węzły wyposażone są w baterie o ograniczonej pojemności.

Czas życia sieci sensorowej jest ograniczony pojemnością baterii poszczególnych węzłów w sieci. W literaturze najczęściej przyjmuje się, że czas życia sieci sensorowej oznacza czas do rozładowania baterii jednego węzła lub wszystkich węzłów [12–14].

Założmy, że  $e_i(t)$  oznacza energię dostępną w węźle  $i$  w chwili  $t$ . Czas życia sieci, definiowany jako czas do rozładowania jednego z węzłów, można opisać wzorem:

$$LT_O = \max\{t : \min_{i \in I} \{e_i(t)\} > 0\}, \quad (1.1)$$

gdzie  $i$  oznacza identyfikator węzła,  $I$  jest zbiorem identyfikatorów wszystkich węzłów w sieci.

W przypadku czasu życia, definiowanego jako czas do rozładowania wszystkich węzłów, wzór przyjmuje postać:

$$LT_A = \max\{t : \max_{i \in I} \{e_i(t)\} > 0\}. \quad (1.2)$$

Stosowane są również inne definicje czasu życia sieci sensorowej. Na przykład, wspomnianą miarę można zdefiniować jako czas, w którym z góry założona liczba węzłów w sieci wyczerpała energię zgromadzoną w swoich bateriach. Istnieje także możliwość określenia czasu życia sieci jako czasu do rozładowania baterii wybranego węzła, który ma najwyższy wskaźnik zużycia energii. W innym przypadku, wspomniany wyżej parametr jest definiowany jako czas do momentu wystąpienia pierwszej awarii podczas akwizycji danych.

Tabela 1.2 zawiera zestawienie różnych definicji czasu życia sieci rozważanych w literaturze. Definicje omawianej miary można klasyfikować w trzech głównych kategoriach, które dotyczą czasu życia węzła, zasięgu i łączności w sieci oraz transmisji danych. Wspomniana miara może również mieć charakter bardziej złożony, w przypadku gdy uwzględnia się różne parametry, których wartości są wyznaczane podczas działania sieci. Definicje z kategorii dotyczącej czasu życia węzłów uwzględniają czas, w którym poszczególne węzły są w stanie brać aktywny udział w przesyłaniu danych. Definicje dotyczące zasięgu i łączności biorą pod uwagę możliwość monitorowania określonego obszaru i zagwarantowania łączności pomiędzy węzłami. Zbiór definicji czasu życia dotyczących transmisji danych bazuje na informacji o niepowodzeniu w akwizycji danych, liczbie wykrywanych zdarzeń oraz innych parametrach opisujących jakość transmisji danych.

Tabela 1.2: Klasyfikacja definicji czasu życia sieci sensorowej

Kategoria	Przykład zastosowania
Czas życia węzła	Czas, po którym pierwszy z dostępnych węzłów rozładuje baterię
	Czas, po którym w sieci pozostaje aktywna określona liczba węzłów
	Czas, po którym pierwszy węzeł nadrzędny rozładuje baterię
	Czas, po którym wszystkie węzły sensorowe rozładują swoje baterie
Zasięg oraz łączność	Czas, przez który monitorowany obszar jest pokryty przez co najmniej $k$ węzłów
	Czas, przez który określony obszar jest pokryty przez co najmniej jeden węzeł
	Czas, po upływie którego pokrycie monitorowanego obszaru lub współczynnik dostarczania pakietów spadnie poniżej ustalonego progu
	Czas, po upływie którego węzły sensorowe nie są w stanie rejestrować zdarzeń we wszystkich monitorowanych obszarach
Transmisja danych	Czas, w którym została przekazana określona ilość danych
	Czas, w którym sieć staje się niezdolna do utrzymania zadanego współczynnika wykrywania zdarzeń
	Czas, po którym wystąpiła pierwsza awaria w procesie zbierania danych
Mieszana	Złożona metryka, stanowiąca połączenie wyżej wymienionych parametrów dotyczących dostępności węzłów, pokrycia, łączności i zbierania danych.

## 1.2 Przegląd technologii sieci sensorowych

W sieciach sensorowych mogą być stosowane różne metody komunikacji bezprzewodowej, bazujące na wykorzystaniu fal radiowych, ultradźwięków, lub podczerwieni. Zdecydowanie najpopularniejszą metodą komunikacji jest łączność radiowa [15]. Technologia WiFi była wykorzystywana we wczesnych etapach rozwoju bezprzewodowych sieci sensorowych. Obecnie znajduje zastosowanie w sieciach sensorowych, które wymagają znacznej przepustowości łącza, np. w przypadku transmisji danych wideo z sensorów wizyjnych. Jednak wysokie zużycie energii w przypadku metod transmisji bazujących na standardach IEEE 802.11n powoduje, że nie są one chętnie stosowane w sieciach sensorowych. Typowe wymagania dotyczące transmisji danych w sieci sensorowej są porównywalne z przepustowością rzędu 56 Kb/s, dlatego przepustowość sieci IEEE 802.11n nie byłaby w pełni wykorzystana. W związku z powyższym opracowane zostały różne technologie transmisji bezprzewodowej, które lepiej zaspokajają wymagania sieci sensorowych w zakresie niskiego zużycia energii przy zapewnieniu niższej przepustowości. Jed-



nym z przykładów takich technologii jest standard IEEE 802.15.4, który został zaprojektowany z myślą o komunikacji krótkiego zasięgu w sieciach sensorowych o niskim poborze energii.

W odpowiedzi na rosnące wymagania dotyczące minimalizacji zużycia energii opracowano standardy łączności bezprzewodowej stworzone z myślą o sieciach sensorowych oraz Internecie Rzeczy. Przykładem takiego standardu jest HaLow [16]. Jest on technologią opracowaną przez organizację IEEE, która jest często określana jako standard 802.11ah. Moduły radiowe wykorzystujące omawiane podejście w przesyłaniu danych, pracują w paśmie 900 MHz, co umożliwia efektywną transmisję danych na większe odległości przy niższym zużyciu energii w porównaniu do niektórych innych standardów WiFi. HaLow został zoptymalizowany pod kątem obsługi dużej liczby urządzeń pracujących w jednej sieci. Standard jest w stanie obsłużyć do kilku tysięcy urządzeń w jednym obszarze, co jest istotne w przypadku potrzeby monitorowania większego obszaru geograficznego. Niski pobór energii został osiągnięty kosztem mniejszej przepustowości transmisji, jednak należy mieć na uwadze to, że w przypadku omawianego standardu priorytetem jest efektywne przesyłanie małych porcji danych.

Kolejnym standardem jest BLE (*ang. Bluetooth Low Energy*) [17]. Jest on energooszczędną wersją technologii Bluetooth. Kluczowymi jego cechami są: niski poziom zużycia energii, szybki czas nawiązywania połączenia oraz optymalizacja dla niewielkich ilości danych. W przeciwieństwie do innych standardów, które zapewniają większy zasięg transmisji, BLE jest dedykowany dla komunikacji na relatywnie krótkich dystansach. Powoduje to, że takie rozwiązanie jest odpowiednie dla zastosowań w sieciach personalnych (PAN, *ang. ang. Personal Area Networks*).

Kolejną technologią opracowaną z myślą o sieciach sensorowych oraz Internecie Rzeczy jest LoRa (*ang. Long Range*) [18]. Jedną z głównych zalet jej stosowania jest zdolność do przesyłania danych na bardzo duże odległości. Przy sprzyjających warunkach pogodowych zapewnia łączność pomiędzy modułami w odległości kilkudziesięciu kilometrów. Znaczny zasięg czyni LoRa atrakcyjnym rozwiązaniem do zastosowań na obszarach wiejskich, miejskich czy przemysłowych. Pomimo, że technologia LoRa została stworzona z myślą o przesyłaniu niewielkich porcji danych, to oferuje ona wystarczającą przepustowość dla wielu aplikacji Internetu Rzeczy i okazuje się rozwiązaniem idealnym w sytuacji, gdzie priorytetem jest efektywne sporadyczne przesyłanie niewielkich pakietów danych. Z uwagi na fakt, że omawiana technologia pracuje w paśmie ISM (*ang. Industrial, Scientific and Medical*) [19, 20], powoduje to zmniejszenie wpływu zakłóceń na jakość transmisji danych. Ogromną zaletą technologii LoRa jest dostępność modułów radiowych w przystępnej cenie, co sprawia, że jest to rozwiązanie stworzone z myślą o sieci wymagającej aktywności dużej liczby urządzeń. Omawiana technologia jest stale rozwijana, co sprawia, że staje się ona wszechstronnym narzędziem, umożliwiającym rozwój sieci sensorowych.

## 1.3 Zastosowania sieci sensorowych

Zakres zadań, który może być realizowany przez węzły sensorowe jest uwarunkowany ich budową, zasobami mocy obliczeniowej, pamięci i energii. Węzły sensorowe o prostej budowie zwykle znajdują zastosowanie w monitorowaniu jednego, konkretnego zjawiska. Węzły o bardziej zaawansowanej konfiguracji mogą stosować wiele technik detekcji i rozpoznawania różnego typu zdarzeń.

W literaturze opisano liczne rozwiązania wsparte technologią sieci sensorowych, które zostały opracowane i wdrożone w celu poprawy jakości życia człowieka. Sieci sensorowe były wykorzystywane do gromadzenia informacji i wykrywania pewnych zdarzeń o istotnym znaczeniu w danych warunkach fizycznych oraz środowiskowych. Należy zwrócić uwagę na fakt, że każdy węzeł sensorowy jest zdolny do rejestrowania odczytów czujników, przetwarzania danych i komunikowania się z innymi węzłami w sieci, co pozwala na zastosowanie sieci sensorowych w różnych obszarach życia i działalności człowieka [21, 22].

Jednym z najstarszych obszarów zastosowania sieci sensorowych jest monitoring środowiska, począwszy od śledzenia zwierząt stadnych po kontrolowanie obszarów o ograniczonej dostępności. Potencjalnym zastosowaniem sieci sensorowych są również pola walki [23], gdzie sieci sensorowe są wykorzystywane do detekcji intruzów poprzez śledzenie ich aktywności. Wdrożenie sieci sensorowych może okazać się bardzo przydatne w usprawnieniu logistyki, gdzie szczególnie istotne jest dostarczenie przesyłki bez naruszenia jej zawartości.

Kolejnym ważnym obszarem zastosowań sieci sensorowych jest medycyna na płaszczyźnie monitorowania stanu zdrowia [24]. Sieć sensorowa pozwala opiekunom na monitorowanie stanu pacjentów w szpitalu lub w domu. Szybka reakcja na krytyczne zdarzenie jest kluczowa w przypadku osób starszych lub wymagających hospitalizacji. Zastosowanie sieci sensorowych pozwala ograniczyć czas reakcji na zdarzenie do minimum.

W erze rozwijającej się technologii Internetu Rzeczy istnieje szereg aplikacji wykorzystujących sieci sensorowe, które znajdują zastosowanie nie tylko podczas projektowania inteligentnych miast [25] czy inteligentnego otoczenia, ale również w przypadku wysokowydajnego rolnictwa [26].

W celu poprawy jakości życia człowieka zaproponowano wiele zastosowań sieci sensorowych, które można sklasyfikować w sposób przedstawiony na rys. 1.6. Do przykładowych zastosowań sieci sensorowych można zaliczyć: kontrolę łańcucha dostaw dla celów handlu detalicznego [27], zdalne sterowanie urządzeniami domowymi [28], automatyzację zakładów przemysłowych, kontrolę ruchu drogowego, kolejowego oraz lotniczego.

Pomimo szerokiego zakresu zastosowań bezprzewodowych sieci sensorowych, fundamentalnym problemem pozostaje czas ich życia. Użyteczność sieci sensorowej jest ściśle powiązana z jej zdolnością do długotrwałej pracy. W związku z korzyściami płynącymi z ich wykorzystania, zarządzanie dostępną energią w węzłach sensorowych oraz wydłużanie czasu ich życia pozostają kluczowymi obszarami prowadzonych badań.



Rys. 1.6: Obszary zastosowania sieci sensorowych

## 1.4 Motywacja pracy

W niniejszej pracy podjęto problem wydłużania czasu życia bezprzewodowych sieci sensorowych, w których węzły są grupowane w klastry, a w każdym klastrze wybierany jest węzeł nadrzędny (rys. 1.5). Jak wyjaśniono na początku tego rozdziału, aby wydłużyć czas życia sieci, rola węzła nadrzędnego musi być przekazywana pomiędzy węzłami sensorowymi należącymi do klastra.

Obecnie dostępne algorytmy wyboru i zmiany węzła nadrzędnego w klastrze sieci sensorowej nie pozwalają na w pełni efektywne wykorzystanie zasobów energii węzłów, które transmitują dane nieregularnie. W większości dostępnych algorytmów zmiana węzła nadrzędnego jest realizowana po upływie predefiniowanego czasu. Innym podejściem jest wybór nowego węzła nadrzędnego, gdy dotychczasowy węzeł nadrzędny zużyje określoną część swoich zasobów energii. Ponadto, kolejność w której poszczególne węzły w klastrze pełnią rolę węzła nadrzędnego jest dla tych algorytmów z góry ustalona i nie podlega zmianom. Czasowa zmiana węzła nadrzędnego jest efektywna tylko w przypadku, gdy wszystkie węzły transmitują dane cyklicznie, w każdym kroku pracy sieci sensorowej. Metody uwzględniające bieżące zużycie energii w węzłach są trudne w implementacji, ponieważ wymagałyby ciągłego monitorowania poboru prądu przez węzeł sensorowy za pomocą dodatkowego modułu. Metody te wymagają więc nie tylko dodatkowych obliczeń, lecz także zwiększają koszt budowy węzła sensorowego.

Istnieje zatem potrzeba opracowania nowych algorytmów umożliwiających dokonywanie wyboru i zmiany węzła nadrzędnego w taki sposób, aby wydłużyć czas życia sieci sensorowej, gdy węzły przesyłają dane nieregularnie. Nieregularna transmisja danych oznacza, że dla każdego węzła sensorowego prawdopodobieństwo transmisji może przyjmować inną wartość i zmieniać się w czasie.

Dostępne algorytmy wyboru i zmiany węzła nadrzędnego nie uwzględniają różnych możliwości definiowania czasu życia sieci sensorowej. W związku z powyższym nie ma możliwości dostosowania pracy wspomnianych algorytmów do specyficznych wymagań, które przekładają

się na przyjętą w danym przypadku definicję czasu życia. W niniejszej pracy rozpatrywane są dwie różne definicje czasu życia, tj. czas do rozładowania jednego węzła i czas do rozładowania wszystkich węzłów w sieci. W przypadku systemów, które przyjmują czas życia sieci jako moment rozładowania jednego węzła zakłada się, że w procesie akwizycji danych wszystkie węzły są jednakowo ważne. Brak danych z jednego węzła może prowadzić do nieprawidłowych wyników analizy dostępnej informacji i błędnych wniosków. Może to skutkować niedokładnymi ostrzeżeniami lub opóźnieniami w reakcji na występujące zdarzenia. Przykładem zastosowania sieci sensorowych, gdzie istotne jest utrzymanie jak najdłużej wszystkich węzłów, jest system monitorowania środowiska w obszarach narażonych na katastrofy naturalne [29]. Podczas zbliżającego się zagrożenia informacje zebrane przez węzły sensorowe odgrywają kluczową rolę w zapewnieniu efektywnego systemu wczesnego ostrzegania np. tsunami [30]. Zebranie kompletnych danych pozwala na precyzyjną ocenę skali nadchodzącego zagrożenia, minimalizując tym samym potencjalne straty ludzkie oraz materialne.

Ponadto, istnieją sieci sensorowe, gdzie kluczowe jest jak najdłuższe utrzymanie działania jednego węzła. W przypadku monitorowania ruchu drogowego [31], sieci sensorowe znajdują zastosowanie w celu precyzyjnego określenia położenia pojazdów. W sytuacji rozmieszczenia wzdłuż wybranego pasa ruchu wielu węzłów sensorowych możliwe staje się śledzenie pojazdów w czasie rzeczywistym oraz akwizycji danych dotyczących prędkości, kierunku oraz czasu przejazdu. W przypadku, gdy baterie dołączone do węzłów ulegają stopniowemu rozładowaniu, monitorowanie ruchu drogowego może być ograniczone. Jednakże, gdy w zaprojektowanej sieci pozostanie przynajmniej jeden aktywny węzeł, wciąż istnieje możliwość określenia czy w monitorowanym obszarze znajduje się pojazd. W ten sposób pomimo ograniczonej dostępności zasobów sieć sensorowa pozwala na podstawowe monitorowanie ruchu drogowego.

W niniejszej pracy podjęto próbę opracowania algorytmów spełniających wspomniane wyżej wymagania, przyjmując dwie popularne definicje czasu życia opisane wzorami (1.1) i (1.2).

## 1.5 Cele pracy

Głównym celem pracy jest zaproponowanie algorytmów wyboru roli węzłów w klastrze sieci, które będą umożliwiały lepsze wykorzystanie dostępnych zasobów energii poprzez wydłużenie czasu życia bezprzewodowych sieci sensorowych. Opracowane algorytmy pozwolą na wyeliminowanie wad dostępnych metod. Realizacja określonego powyżej celu głównego obejmuje następujące etapy:

- **Przeprowadzenie analizy porównawczej** związanej z tematyką niniejszej rozprawy w zakresie istniejących metod wydłużania czasu życia sieci sensorowych i algorytmów selekcji węzła nadrzędnego w klastrze.
- **Opracowanie własnych algorytmów selekcji węzła nadrzędnego**, które uwzględniają prawdopodobieństwa transmisji danych z poszczególnych węzłów.
- **Przygotowanie środowiska badawczego** – fizycznego modelu sieci sensorowej oraz

implementacja w nim opracowanych algorytmów i reprezentatywnych algorytmów dostępnych w literaturze. Model fizyczny został opracowany w dwóch wersjach różniących się zastosowaną technologią transmisji danych (ZigBee oraz LoRaWAN (ang. *Long Range Wide Area Network*)).

- **Przeprowadzenie eksperymentów z wykorzystaniem fizycznego modelu sieci**, które obejmują pomiar zużycia energii i czasu życia węzłów sensorowych dla porównywanych algorytmów.
- **Opracowanie i implementacja modelu obliczeniowego**, który odwzorowuje model fizyczny sieci sensorowej oraz kalibrację modelu obliczeniowego na podstawie wyników eksperymentów przeprowadzonych na modelu fizycznym.
- **Przeprowadzenie eksperymentów z wykorzystaniem modelu obliczeniowego** dla wielu zróżnicowanych scenariuszy uwzględniających stałe i zmienne prawdopodobieństwa transmisji danych z poszczególnych węzłów sensorowych. Wykonane zostały badania czasu życia bezprzewodowej sieci sensorowej dla porównywanych algorytmów selekcji węzła nadrzędnego.

## 1.6 Teza pracy

Biorąc pod uwagę przedstawione wyżej cele i motywację, sformułowano następującą tezę pracy:

*Uwzględnienie prawdopodobieństw transmisji danych w algorytmie podejmowania decyzji dotyczącej zmiany węzła nadrzędnego pozwala wydłużyć czas życia sieci sensorowej składającej się z węzłów współpracujących w ramach klastra.*

Pojęcia użyte do sformułowania tezy zostały doprecyzowane w poniższych definicjach:

- *sieć sensorowa* – bezprzewodowa sieć łącząca węzły sensorowe wyposażone w moduł czujników, moduł procesora, moduł radiowy oraz źródło energii o ograniczonej pojemności;
- *klaster sieci* – grupa węzłów sensorowych, z których jeden pełni rolę węzła nadrzędnego, a pozostałe są węzłami podrzędnymi, węzły podrzędne mogą przysyłać dane pozyskane z czujników do węzła nadrzędnego. Węzeł nadrzędny gromadzi dane z pozostałych węzłów w klastrze, ponadto może przetwarzać zgromadzone dane i przysyłać je do stacji bazowej;
- *prawdopodobieństwa transmisji danych* – prawdopodobieństwa przesłania danych do węzła nadrzędnego przez poszczególne węzły podrzędne w danym cyklu pracy sieci sensorowej;
- *czas życia sieci* – czas wyznaczany zgodnie ze wzorem (1.1) lub (1.2).

Wydłużenie czasu życia sieci sensorowej wyznaczone jest w odniesieniu do czasu życia, jaki można osiągnąć po zastosowaniu opisanych w pracy algorytmów znanych z literatury.

## 1.7 Zawartość pracy

Praca składa się z dwóch zasadniczych części: pierwsza z nich (rozdziały 2. i 3.) obejmuje przegląd aktualnego stanu nauki i techniki w zakresie metod wydłużania czasu życia sieci sensorowych, w szczególności poprzez wybór węzłów nadrzędnych.

W rozdziale 2. na podstawie dokonanego przeglądu literatury wykazano zalety, ograniczenia i wady dostępnych metod. Szczegółowo scharakteryzowano metody mające na celu wydłużanie czasu życia sieci sensorowej, uwzględniając ich podział na pięć głównych kategorii, tj.: metody przydzielania zasobów przy uwzględnieniu wielowarstwowego modelu sieci, metody pozyskiwania energii, metody bazujące na kształtowaniu wiązki, metody redukcji transmisji, oraz metody klasteryzacji i zmiany roli węzła. Aktualnie wielu badaczy skupia się na problemie klasteryzacji, który obejmuje algorytmy mające na celu podzielenie sieci składającej z wielu węzłów w łatwiejsze do zarządzania grupy [32–34]. Konsekwencją klasteryzacji jest nierównomierność zużycia energii przez poszczególne węzły. Z tego powodu ważna jest implementacja reguł mających na celu balansowanie obciążenia, prowadząc tym samym do wydłużenia czasu życia sieci.

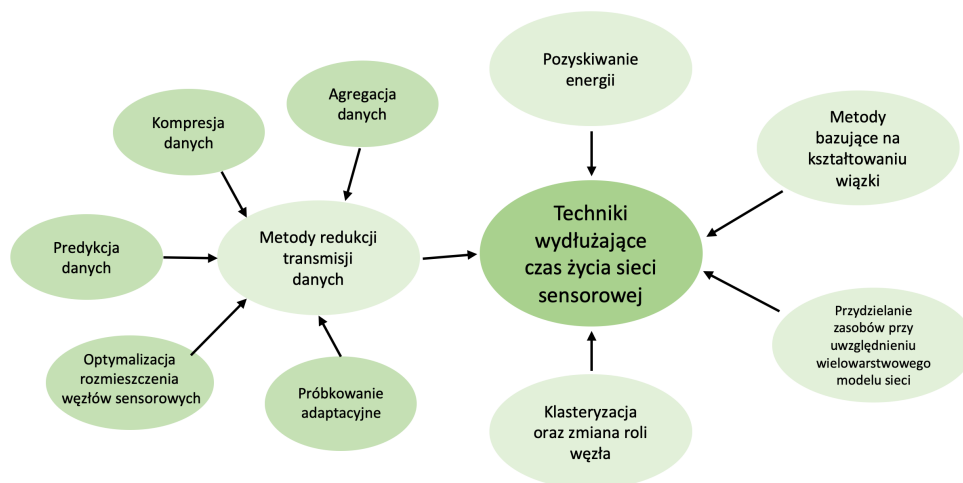
Rozdział 3. został poświęcony aktualnie stosowanym w sieciach sensorowych metodom przekazywania roli węzła nadrzędnego. Wspomniane metody podzielono na dwie kategorie: metody bazujące na pomiarze czasu oraz metody bazujące na pomiarze zużycia energii przez węzeł. Algorytmy należące do pierwszej grupy przydzielają rolę węzła nadrzędnego na określony czas. Do drugiej kategorii zalicza się podejścia, które przydzielają rolę węzłom na podstawie chwilowego zużycia lub pozostałej ilości energii.

Druga część pracy poświęcona jest proponowanym algorytmom wyboru i zmiany węzła nadrzędnego. Rozdział 4. przedstawia koncepcję opracowanych algorytmów dla problemu wydłużenia czasu życia sieci sensorowej, które uwzględniają dwie najczęściej wykorzystywane metryki, tj. czas do rozładowania jednego węzła oraz czas do rozładowania wszystkich węzłów. Na tym etapie określono warunki, które musi spełnić opracowany algorytm, aby wydłużyć czas życia sieci. Warty odnotowania jest fakt, że proponowane rozwiązanie bierze pod uwagę przypadek węzłów sensorowych, które transmitują dane nieregularnie - w wybranych cyklach pracy sieci, tzn. z różnym prawdopodobieństwem. W rozdziale przeprowadzono również analizę złożoności czasowej proponowanych algorytmów. Rozdział 5. poświęcono modelowi bezprzewodowej sieci sensorowej, który opisuje szczegóły implementacji zarówno proponowanych, jak i istniejących (porównywanych) algorytmów. Rozdział 6. przedstawia przeprowadzone eksperymenty i wyniki, które potwierdziły przydatność opracowanych rozwiązań. Należy zauważyć, że zaproponowane algorytmy zostały zaimplementowane w rzeczywistych węzłach sieci sensorowej. Jest to szczególnie ważne dla oceny proponowanych algorytmów, ponieważ w ten sposób potwierdzono możliwość ich praktycznej implementacji. Podsumowanie uzyskanych wyników, wnioski i dalsze kierunki badań nad metodami wydłużania czasu życia sieci sensorowych opisano w rozdziale 7.

## Rozdział 2

# Przegląd metod wydłużania czasu życia sieci sensorowej

W literaturze zaproponowanych zostało wiele metod mających na celu wydłużenie czasu życia sieci sensorowej, które można sklasyfikować w sposób zilustrowany na rys. 2.1. Klasyfikacja przedstawiona na rys. 2.1 została zaproponowana w oparciu o przegląd literatury, w którym uwzględniono szerokie spektrum rozwiązań. Proponowane w literaturze metody bazują na różnych definicjach czasu życia oraz uwzględniają specyfikę różnych zastosowań i topologii bezprzewodowych sieci sensorowych. W kolejnych podrozdziałach zostaną szczegółowo scharakteryzowane poszczególne klasy tych metod.



Rys. 2.1: Metody wydłużające czas życia sieci sensorowej

## 2.1 Przydzielanie zasobów przy uwzględnieniu wielowarstwowego modelu sieci

Na przestrzeni lat opracowane zostały różne podejścia, których głównym zadaniem jest wprowadzenie mechanizmu oszczędzania energii poprzez stosowanie odpowiednich rozwiązań odnoszących się do poszczególnych warstw 7-warstwowego modelu OSI [35–43]. Głównym obszarem optymalizacji jest warstwa fizyczna, łącza danych oraz sieci.

Wydłużenie czasu życia sieci w zakresie funkcjonowania warstwy fizycznej może być zrealizowane poprzez zmniejszenie mocy nadawczej modułu radiowego [44]. Regulacja mocy nadawczej pozwala na dostosowanie zasięgu komunikacji w zależności od konkretnych wymagań apli-

kacji. W sytuacjach, gdy duży zasięg nie jest konieczny, można zredukować moc nadawczą, aby zminimalizować zużycie energii. Zaletą zastosowania wspomnianej metody jest ograniczenie interferencji między węzłami sensorowymi, co przekłada się na efektywniejszą komunikację i mniejsze zużycie energii podczas transmisji danych.

Bardzo często węzły sieci nie mają możliwości precyzyjnego regulowania mocy nadawczej. Zwykle parametr związany z mocą nadajnika ogranicza się do wyboru jednej z kilku dostępnych opcji, którą ustala się na etapie konfiguracji węzła. Warty odnotowania jest fakt, że w sieci, w której pracuje niewielka liczba węzłów sensorowych rejestrujących zdarzenia na dużym obszarze, moduły radiowe poszczególnych węzłów muszą stale używać dużej mocy do transmisji danych. W takim przypadku wspomniana wyżej metoda wydłużenia czasu życia sieci nie znajduje zastosowania.

W celu uzyskania oszczędności energii można również w odpowiednich momentach wyłączać (usypiać) moduł nadawczy. Jednak, jak przedstawiono w pracy [5] moduły radiowe zużywają najwięcej energii podczas ich uruchamiania. Z drugiej strony, implementacja algorytmów, które w ogóle nie zakładają usypiania modułów nadawczo-odbiorczych może skutkować tym, że czas życia sieci tylko w nieznacznym stopniu ulegnie poprawie.

Prace związane z optymalizacją działania sieci w odniesieniu do warstwy łącza danych (warstwa 2 modelu OSI) zaowocowały opracowaniami algorytmów, które w skuteczny sposób wyznaczają momenty umieszczenia danych w medium transmisyjnym, minimalizując przy tym liczbę ewentualnych retransmisji po wystąpieniu kolizji lub po tymczasowym braku łączności. Najprostszym rozwiązaniem jest transmitowanie ramek danych z poszczególnych węzłów w zdefiniowanych slotach czasowych [45]. Sposób ustalania harmonogramu dostępu do medium transmisyjnego jest wciąż rozwijanym oraz ważnym tematem badawczym [46, 47]. Warty uwagi jest fakt, że urządzenia w sieci mogą być usypiane w okresach, gdy nie uczestniczą w przesyłaniu danych, co przyczynia się do możliwości wydłużenia czasu życia sieci sensorowej. Przydzielenie slotu czasowego musi być realizowane z dużą precyzją. W przeciwnym przypadku sieć narażona jest na konieczność retransmisji danych, co może prowadzić do skrócenia czasu życia sieci sensorowej. W przypadku, gdy dany węzeł sieci odbiera dane z wielu węzłów sąsiadujących, czas nasłuchiwanie transmisji przychodzących powinien być tak dobrany dla danego węzła, aby wszystkie węzły sąsiednie mogły przesłać swoje dane. Należy zwrócić uwagę na fakt, że w trakcie pracy sieci liczba aktywnych węzłów sąsiednich może się zmieniać. W miarę rozładowywania baterii poszczególnych węzłów sloty czasowe dla nieaktywnych węzłów powinny być eliminowane [48]. Złożony proces dostosowania slotów czasowych do aktualnych warunków pracy sieci może negatywnie wpłynąć na jej czas życia, ponieważ podczas ustalania harmonogramu udostępniania medium transmisyjnego aktywnym węzłom należy przesłać dodatkowe informacje dotyczące slotu czasowego.

Algorytmy pracujące w warstwie trzeciej modelu OSI (warstwa sieciowa) to w głównej mierze rozwiązania mające na celu wypracowanie optymalnych ścieżek routingu [49]. Protokoły routingu określają optymalne, dynamiczne trasy wymiany informacji pomiędzy węzłami senso-



rowymi w zależności od warunków pracy sieci. Wspomniane protokoły w sieciach sensorowych mają istotny wpływ na czas życia sieci np. poprzez wybór tras z uwzględnieniem aktualnego poziomu energii poszczególnych węzłów. Podczas implementacji protokołu trasowania bierze się pod uwagę również takie parametry jak przepustowość, zasięg, opóźnienia end-to-end oraz kolizje [50]. Protokoły routingu dzielimy na reaktywne, proaktywne oraz hybrydowe [51]. W protokołach proaktywnych każdy węzeł w sposób ciągły stara się utrzymać możliwie najnowsze informacje na temat tras do pozostałych węzłów [52, 53]. W przypadku protokołów reaktywnych trasa jest wyznaczana na żądanie, np. gdy węzeł sensorowy zgromadzi dane, które muszą być przekazane do stacji bazowej [54, 55]. Zwykle podejścia reaktywne wiążą się z niższym zużyciem energii i większymi opóźnieniami w porównaniu do protokołów proaktywnych [56]. W sytuacji często zmieniającej się topologii sieci, protokoły trasowania muszą wielokrotnie aktualizować ścieżki routingu. Wiąże się to z dodatkowym narzutem transmisji, ponieważ podczas odkrywania i ustalania tras poszczególne węzły sieci są zobligowane do aktywacji swoich modułów radiowych oraz przesłania odpowiednich komunikatów. Częste wyznaczanie nowych tras może prowadzić do istotnego wzrostu zużycia energii i zmniejszenia czasu życia sieci. Odpowiednio zaprojektowane protokoły routingu mogą ograniczać zużycie energii związanej z procesem odkrywania tras i wydłużyć czas życia sieci sensorowej dzięki preferowaniu tras transmisji, które są energetycznie efektywne.

## 2.2 Pozyskiwanie energii

Pozyskiwanie energii to proces, w którym poszczególne węzły sensorowe uzyskują energię z otaczającego je środowiska lub specjalnie zaprojektowanych układów, które zamieniają energię jednego typu na energię elektryczną. Dodatkowe źródło zasilania pozwala uzupełnić zasoby energii zgromadzone w baterii, wydłużając tym samym czas życia węzła. Pozyskiwanie energii należy traktować jako rozwiązanie komplementarne względem pozostałych metod, które w przypadku możliwości wdrożenia dla węzłów sensorowych pozwala dodatkowo wydłużyć czas życia całej sieci. Energia dostarczana do węzłów sensorowych może pochodzić z różnych źródeł. Najbardziej popularne rozwiązania tego typu zostały scharakteryzowane poniżej.

Przykładem implementacji wspomnianej metody jest wykorzystanie paneli fotowoltaicznych, które pozwalają na przekształcenie energii pochodzącej ze Słońca na energię elektryczną. Metoda znajduje szczególne zastosowanie w miejscach o dużym nasłonecznieniu. Wykorzystanie paneli fotowoltaicznych do wydłużania czasu życia sieci ma istotne ograniczenia, m.in. ze względu na wymiary niezbędnych urządzeń, których instalacja może być niewykonalna ze względu na lokalizację węzła sensorowego, sposób jego montażu lub mobilność. Podczas przeglądu dostępnych ogniw fotowoltaicznych można zwrócić uwagę na ich niewielką sprawność sięgającą kilkunastu procent [57], która z czasem obniża się do kilku procent. Wydajność panelu fotowoltaicznego może być różna w zależności od szerokości geograficznej, ukształtowania terenu, zanieczyszczenia powietrza, rodzaju zabudowań, roślinności, a nawet mikroklimatu. Podczas im-

plementacji omawianej metody należy dodatkowo pamiętać, że w niesprzyjających warunkach może dojść do zanieczyszczenia panelu słonecznego, co prowadzi do zmniejszenia wydajności takiej instalacji.

Termiczne pozyskiwanie energii jest obiecującą metodą przekształcenia swobodnie dostępnej energii w bardziej użyteczną formę, jaką jest energia mechaniczna lub elektryczna. Istnieje bogaty zasób niewykorzystanej energii cieplnej o pochodzeniu naturalnym jak i sztucznym. Obejmuje on między innymi energię geotermalną, wulkaniczną, słoneczną czy ciepło wytwarzane przez silniki spalinowe. W przypadku gdy marnotrawiona dotąd energia mogłaby być pozyskana i użyta, stanowiłaby cenne, wszechobecne i przyjazne dla środowiska źródło energii [58]. W sieciach sensorowych najczęstszą formą termicznego pozyskiwania energii jest wykorzystanie zjawiska termoelektrycznego oraz piroelektrycznego [59]. Układy wykorzystujące zjawisko termoelektryczne bazują na efekcie Seebecka [60]. Generują one prąd stały w odpowiedzi na przestrzenne zmiany temperatury zwane gradientami. Składają się one z dwóch płyt oddzielonych parami bloków półprzewodników typu p i n ułożonych równoległe, lecz elektrycznie połączonych szeregowo. Jedna ze stron pełni rolę "strony gorącej", podczas gdy druga jest "stroną zimną". Napięcie obwodu zależy od różnicy temperatury między stroną gorącą, a zimną oraz właściwości materiałowych [61]. Ogólnie rzecz biorąc, wyższa różnica temperatury pozwala na osiągnięcie większej sprawności przekształcania energii [62, 63]. W przypadku umieszczenia układu w stabilnym, ogrzewanym otoczeniu, termoelektryczny system przestanie generować energię po pewnym czasie, gdy obie płyty osiągną tę samą temperaturę [64].

Kolejną formą termicznego pozyskiwania energii jest układ wykorzystujący efekt piroelektryczny. Wspomniane zjawisko polega na tym, że pewne materiały dielektryczne wykazują zdolność do generowania ładunku elektrycznego w odpowiedzi na zmiany temperatury. Materiały te, nazywane piroelektrykami, posiadają strukturę krystaliczną, w której dipole elektryczne ulegają przemieszczeniu w wyniku zmiany temperatury. To przemieszczenie dipoli prowadzi do polaryzacji materiału, a w rezultacie do generacji ładunku elektrycznego. W celu pobudzenia procesu konwersji energii, generatory piroelektryczne wymagają cyklicznych zmian temperatury, a więc nie generuje się ładunku w przypadku, gdy temperatura pozostaje stała [65]. Pomimo, że termiczne pozyskiwanie energii cechuje się niską sprawnością sięgającą 10% [66], z powodzeniem mogą być one znaleźć zastosowanie w sieciach sensorowych pracujących w niskich temperaturach. Warto zwrócić uwagę na niezawodność omawianej metody, która wynika z faktu, że układ nie zawiera ruchomych elementów jak ma to miejsce np. w turbinach wiatrowych.

Technologie pozyskiwania energii pochodzących z stały się przedmiotem znacznego zainteresowania w ciągu ostatnich dziesięciu lat [67–69]. Integracja technologii pozyskiwania energii z drgań z infrastrukturą miejską jest jeszcze w początkowej fazie rozwoju [70]. Wiele zespołów badawczych podejmuje wysiłek w celu opracowania urządzeń konwertujących energię mechaniczną za pomocą różnych mechanizmów konwersji. W ostatnich latach do pozyskiwania energii coraz częściej wykorzystuje się zjawisko piezoelektryczne. Polega ono na indukcji ładunku elektrycznego w materiale do którego przykładana jest siła lub wystąpi naprężenie. Elementy

piezoelektryczne mogą przybierać różne kształty takie talerze, cylindry czy dyski [71]. Zdolność przetworników energii kinetycznej do pozyskiwania energii wibracji otoczenia może być przydatna dla dużych obiektów infrastrukturalnych zwłaszcza dla konstrukcji mostów [72–74]. Zaletą stosowania wspomnianej metody pozyskiwania energii jest fakt, że wykorzystują one naturalne ruchy i drgania, które są obecne w środowisku. Generują one energię w wyniku subtelnych drgań czy ruchów, co sprawia, że ich praca jest cicha i niezauważalna. Ponadto, piezoelektryki są znane z wytrzymałości i długotrwałej pracy - mają tendencję do minimalnego zużywania się w wyniku eksploatacji, co przekłada się na długą żywotność [75]. Przetworniki piezoelektryczne są stosunkowo małe oraz lekkie, co ułatwia ich integrację w różne struktury i urządzenia. Technologia pozyskiwania energii przez piezoelektryki ma wiele zalet, jednak również posiada pewne wady. Piezoelektryki mogą być mniej skuteczne przy niskich częstotliwościach drgań. Dla niektórych zastosowań, gdzie dominują niskie częstotliwości, inne technologie pozyskiwania energii, takie jak generatory termoelektryczne, mogą być bardziej efektywne [76]. Dodatkowo, należy pamiętać, że skuteczność piezoelektryków zależy od dostępnego źródła wibracji. W przypadku braku wystarczających wibracji w otoczeniu, piezoelektryki mogą generować niewielką ilość energii [77].

W ostatnich latach pozyskiwanie energii z fal radiowych jest obiektem intensywnych badań, które mają na celu wykorzystania tego typu źródła energii do zasilania węzłów sieci sensorowej [78–80]. Do pozyskiwania energii z fal radiowych stosuje się specjalne anteny zwane rectennami. Pozwalają one na przechwytywanie sygnałów elektromagnetycznych emitowanych z pobliskich źródeł takich jak telefony komórkowe czy stacje radiowe. Następnie, za pomocą wbudowanego układu prostującego otrzymany z anteny sygnał jest zamieniany na postać napięcia stałego [81]. Niektóre źródła fal radiowych przesyłają znaczne ilości energii (rzędu kilku megawatów), lecz z powodu strat energii, sygnały docierające do anten pozyskujących są na relatywnie niskim poziomie [82]. Z tego powodu tematem prac badawczo-rozwojowych jest zaprojektowanie anteny, która zwiększy wydajność pozyskiwania energii wspomnianą metodą [83]. W przypadku opisywanego podejścia pozyskiwanie energii może okazać się wydajne w przypadku terenów miejskich, gdzie występuje duże zagęszczenie źródeł promieniowania oraz odległość między nimi, a anteną odbiorczą jest niewielka [84]. W przypadku, gdy dostępność pasma jest ograniczona z powodu rywalizacji, wówczas energia, którą może pozyskać antena maleje, co może wpłynąć na wydajność takiego sposobu pozyskiwania energii. Z tego powodu projektanci anten muszą uwzględnić wspomnianą rywalizację, aby zapewnić, że rozwiązanie będzie skuteczne w zatłoczonym środowisku radiowym.

## 2.3 Metody bazujące na kształtowaniu wiązki

Kolejnym sposobem pozwalającym na wydłużenie czasu życia sieci jest wykorzystanie technik związanych z przetwarzaniem sygnału. Technologia kształtowania wiązki pozwala, zamiast rozprzestrzeniania sygnału w sposób równomierny we wszystkich kierunkach, formować

wiązkę sygnału w określonym kierunku. Kształtowanie wiązki minimalizuje interferencje od innych źródeł sygnałów radiowych [85]. Redukcja interferencji skutkuje zmniejszeniem podatności na wystąpienie kolizji, co z kolei wpływa na efektywność energetyczną oraz czas życia węzłów sensorowych [86]. Kształtowanie wiązki sygnału w kierunku konkretnego węzła redukuje straty promieniowania oraz pozwala na zmniejszenie mocy nadawczej modułu radiowego, co pozytywnie wpływa na czas życia sieci sensorowej [87, 88].

Istnieją dwa główne podejścia mające na celu formowanie wiązki. Kształtowanie analogowe jest realizowane poprzez kontrolowanie faz sygnałów wysyłanych przez różne anteny, które tworzą szyk antenowy. W ten sposób możliwe staje się skierowanie wiązki w określonym kierunku [89]. Należy pamiętać, że podejście to znajduje zastosowanie w systemach, gdzie przetwarzanie sygnału jest realizowane na poziomie sprzętowym.

W przypadku kształtowania cyfrowego, sygnał dla każdej anteny jest poddawany cyfrowej obróbce, a następnie sygnały są sumowane lub przemnażane w sposób, który skutkuje formowaniem wiązki w wybranym kierunku [90]. Technika kształtowania analogowego jest prostsza i bardziej energooszczędna niż formowanie cyfrowe, ale ma ograniczenia pod względem adaptacyjności i rekonfigurowalności. Z tego powodu często tworzy się rozwiązania hybrydowe łączące zalety obu podejść [91].

Pomimo ogromnych zalet wynikających z formowania wiązki promieniowania, omawiana metoda posiada także szereg wad, które należy uwzględnić podczas projektowania sieci. Pierwszą z nich jest złożoność sprzętowa, wynikająca z tego, że moduły komunikacyjne podczas przesyłania danych muszą przewidywać wykorzystanie wielu anten. Ponadto, system kształtowania wiązki wymaga implementacji złożonych algorytmów [92, 93], które są opracowane z myślą o zapewnieniu działania omawianego mechanizmu. Liczba modułów komunikacyjnych stale się zwiększa, lecz wciąż można zaobserwować ograniczony zbiór rozwiązań, który oferuje technologię beamformingu. Z czasem można oczekiwać wzrostu dostępności modułów radiowych wykorzystujących technikę formowania wiązki przy jednoczesnym spadku ich ceny. W sieciach sensorowych, gdzie często zakłada się mobilność węzłów sensorowych dochodzi do częstej zmiany topologii, co może prowadzić do częstego przeliczania złożonego algorytmu przewidzianego w technice beamformingu. Takie zachowanie może zwiększyć zapotrzebowanie na energię, a tym samym bateria w systemie formowania wiązki może szybciej się wyczerpać. Wspomniana technologia nie należy do rozwiązań uniwersalnych, ponieważ zysk wynikający z omawianej metody ma zastosowanie w węzłach znacznie oddalonych od stacji bazowej.

## 2.4 Metody redukcji transmisji danych

Czas życia sieci sensorowej może zostać w istotny sposób wydłużony dzięki zmniejszeniu ilości danych transmitowanych przez węzły sensorowe. Redukcja transmisji prowadzi do znaczących oszczędności energii. Wspomniana metoda wydłużania czasu życia sieci sensorowej polega na eliminacji transmisji danych, które nie są niezbędne do realizowania zadań pełnio-

nych przez sieć. W literaturze proponowane są różne podejścia do redukcji transmisji danych w bezprzewodowych sieciach sensorowych [94–98]. Metody te można podzielić na pięć głównych kategorii, tj. agregację danych, kompresję danych, próbkowanie adaptacyjne, algorytmy uczenia maszynowego wyzwalane zdarzeniem oraz optymalizację rozmieszczenia węzłów sensorowych.

### 2.4.1 Agregacja danych

Agregacja danych w sieciach sensorowych jest procesem łączenia oraz przetwarzania danych pozyskanych od poszczególnych węzłów w sieci. Konsekwencją takiego podejścia jest utworzenie bardziej kompleksowych i użytecznych zestawów informacji. Implementacja technik związanych z agregacją danych niesie ze sobą szereg zalet. Omawiana technika pozwala na ograniczenie transmisji danych, co z kolei prowadzi do oszczędności energii, a zatem może ona prowadzić do wydłużenia czasu życia sieci sensorowej co jest kluczowe w przypadku systemów, które dysponują ograniczonymi zasobami [99]. W sieciach sensorowych węzły często zbierają podobne lub skorelowane dane, agregacja danych pozwala na eliminację redundancji poprzez przekazywanie tylko istotnych informacji. Przesyłanie dużych ilości danych w sieciach sensorowych może prowadzić do przeciążenia i zwiększać opóźnienia. Agregacja danych pomaga w zminimalizowaniu wspomnianego problemu poprzez optymalizację ruchu w sieci.

Metody agregacji danych znajdują szczególne zastosowanie w sieciach, w których występuje przekazywanie danych pomiędzy dużą liczbą węzłów sensorowych. Uzyskuje ona lepsze rezultaty w sytuacji, gdy dużą liczbę węzłów sensorowych rozmieszcza się na małym obszarze. W takiej sytuacji, to samo zdarzenie może zostać wykryte przez wiele węzłów, a zadaniem węzła agregującego jest powstrzymanie od przekazywania nadmiarowych informacji w sieci.

W opisywanym podejściu transmisja danych do stacji bazowej jest realizowana dwuetapowo. W pierwszej kolejności węzły pośredniczące dokonują odbioru kilku wiadomości od swoich sąsiadów, a następnie zagregowaną informację węzeł transmituje do stacji bazowej [95, 100].

Technika agregacji danych została wykorzystana w pracy [101]. W artykule przedstawiono energooszczędny schemat agregacji danych oparty na klastrach. Węzły nadrzędne są wybierane na podstawie częstotliwości zmian topologii sieci oraz rozmieszczenia wszystkich węzłów na danym obszarze. Analiza przedstawionego schematu w różnych scenariuszach pokazuje, że połączenie podejścia opartego na klastrach oraz telefonów komórkowych poprawia czas życia sieci, nie obniżając jakości procesu agregacji danych [102].

W artykule [103] zaproponowano protokół CTEEDG (ang. *Cluster-Tree based Energy Efficient Data Gathering protocol*) mający na celu zwiększenie przepustowości oraz czasu życia sieci sensorowej. Wykorzystuje on logikę rozmytą zaimplementowaną w węźle nadrzędnym do wyboru lokalnie gromadzonych danych. W trakcie działania sieci, pomiędzy klastrami, a stacją bazową tworzy się topologię drzewa, zapewniając najkrótszą ścieżkę transmisji. Otrzymane wyniki wykazały, że omawiane podejście osiąga lepszą wydajność pod względem przepustowości niż w przypadku użycia protokołu FAMACROW [32] oraz metody DL-LEACH [104]. Zapropono-

nowana w artykule metoda redukuje średnie zużycie energii o 29,26% i 49,29% w porównaniu z wymienionymi wcześniej metodami.

Pomimo wielu korzyści, istnieją także wady związane z zastosowaniem agregacji danych. W przypadku, gdy dane muszą być przetwarzane i analizowane w czasie rzeczywistym, agregacja danych może wprowadzać opóźnienia, co jest nieakceptowalne w aplikacjach wymagających natychmiastowej reakcji, na przykład w systemach bezpieczeństwa. Proces agregacji danych może być podatny na błędy, szczególnie w przypadku, gdy w krótkim czasie przesyłane są duże porcje danych. Jeśli węzeł odpowiedzialny za agregację danych ulegnie awarii, może dojść do utraty zgromadzonych danych [105]. Ponadto, implementacja skomplikowanych protokołów agregacji danych może być złożona i wymagać bardziej zaawansowanej infrastruktury, co z kolei może zwiększać koszty i ryzyko awarii [106]. Niektóre metody agregacji danych mogą być podatne na ataki, zwłaszcza w przypadku, gdy przesyłane dane nie są szyfrowane [107, 108].

## 2.4.2 Kompresja danych

Kolejną metodą, która ma na celu wydłużenie czasu życia sieci sensorowej, jest kompresja danych. Polega ona na redukcji przesyłanych danych przy jednoczesnym zachowaniu istotnych informacji. Kompresja danych może być wykonywana bezpośrednio w węzłach sensorowych lub w węzłach pośrednich (nadrzędnych) [109–111]. W zależności od wymagań aplikacji i charakterystyki danych, stosuje się techniki kompresji do których można zaliczyć: kodowanie, kompresję stratną oraz wykorzystanie modeli predykcyjnych.

Celem kodowania jest bardziej efektywne reprezentowanie przesyłanych danych. Przykładem wspomnianej metody jest kodowanie różnicowe, które polega na przesyłaniu tylko zmian pomiędzy kolejno dokonywanymi pomiarami. Po odebraniu różnic przez stację bazową, aktualizuje ona swoją wewnętrzną reprezentację danych, dodając przesłane różnice do ostatnio otrzymanych danych. Ponieważ przesyłane są tylko różnice między pomiarami, zmniejsza się ilość danych, co prowadzi do bardziej efektywnego wykorzystania dostępnej przepustowości sieci oraz redukcji zużycia energii podczas transmisji. Kodowanie różnicowe może nie być efektywne w sytuacji, w której dane zmieniają się w sposób chaotyczny lub gdy różnice są duże w porównaniu z samą wartością pomiaru [112].

Kolejnym przykładem wspomnianej techniki jest kodowanie entropijne, które wykorzystuje statystyczne właściwości danych do ich kompresji. Należy ono do technik adaptacyjnych, tworzy drzewo kodowania na podstawie częstości występowania symboli. Może ono być mniej efektywne w przypadku często zmieniających się danych. Kodowanie entropijne jest techniką bezstratną, co oznacza, że zachowuje wszystkie oryginalne informacje. W przypadkach, gdzie akceptowalna jest pewna utrata danych, metody kompresji stratnej mogą być bardziej efektywne [113, 114].

Techniki takie jak kwantyzacja (redukcja dokładności danych) lub filtracja (usunięcie części danych) mogą prowadzić do uzyskania większej kompresji kosztem precyzji [115].

Pomimo wielu korzyści, kompresja danych posiada również szereg wad. Proces kompresji

stratnej może wprowadzać zniekształcenia w danych, szczególnie jeśli kompresja jest stosowana na danych, które są wrażliwe na zakłócenia. Może to prowadzić do błędnych interpretacji lub wyników analiz. Niektóre algorytmy kompresji stratnej są złożone obliczeniowo, co może stanowić wyzwanie dla węzłów sensorowych o ograniczonych zasobach obliczeniowych [116]. Po skompresowaniu danych w sposób stratny, ich rekonstrukcja może być trudniejsza lub może uniemożliwiać dokładne przywrócenie pierwotnej postaci, zatem, jeśli istnieje potrzeba dokładnego odtworzenia danych, kompresja stratna może być problematyczna [95, 117].

### 2.4.3 Próbkowanie adaptacyjne

Adaptacyjne metody próbkowania pozwalają węzłom sensorowym na dostosowanie częstotliwości próbkowania do charakterystyki monitorowanego sygnału. W efekcie zmniejsza się ilość zbieranych danych oraz liczba transmisji, co pozwala ograniczyć zużycie energii i wydłużyć czas życia sieci. Zgodnie z tym podejściem optymalna częstotliwość próbkowania (odstęp pomiędzy kolejnymi odczytami wartości pochodzących z czujników) jest obliczana w czasie rzeczywistym i dostosowuje się ją w sposób ciągły do zmiennej dynamiki monitorowanego procesu [118–120]. Dostosowanie częstotliwości próbkowania może być przeprowadzone zbiorczo dla grupy węzłów sensorowych lub indywidualnie dla każdego węzła. Ponadto, podczas wdrożenia odpowiednich algorytmów warto mieć na uwadze fakt, że optymalna częstotliwość próbkowania zależy od wzajemnego położenia węzłów sensorowych oraz rodzaju rejestrowanych zdarzeń [121].

Algorytm doboru częstotliwości próbkowania w czasie rzeczywistym oraz redukcji danych rejestrowanych przez elektromiograf, elektrokardiograf oraz elektroencefalograf został omówiony w pracy [122]. Metoda adaptacyjnego próbkowania została opracowana poprzez zastosowanie sieci neuronowej do przewidywania kolejnych próbek i oceny ich niepewności. Zgodnie z tym podejściem, odczyt danych jest realizowany przez węzeł sensorowy, gdy niepewność predykcji przekroczy ustalony próg. Ponadto, w pracy wykazano, że metoda ta zmniejsza liczbę rejestrowanych próbek, ale zachowuje przy tym użyteczną informację zawartą w oryginalnych danych.

Adaptacyjny algorytm próbkowania został omówiony również w pracy [123]. Został on opracowany z myślą o zasilanych bateryjnie urządzeniach internetu rzeczy. Wspomniane podejście dostosowuje częstotliwość dokonywania pomiarów oraz zakres filtracji danych bazując na szacowaniu kolejnych pomiarów w czasie rzeczywistym. Szacowanie jest realizowane na podstawie średniej kroczącej aktualnych pomiarów oraz na podstawie zmienności danych pomiarowych. AdaM (*ang. ADaptive Monitoring*) wykorzystuje dwa algorytmy: jeden do adaptacyjnego pobierania kolejnych próbek i drugi do ich adaptacyjnego filtrowania. Dzięki takiemu podejściu zmniejsza się zużycie energii oraz ilość przesyłanych danych, przy jednoczesnym utrzymaniu dokładności mierzonych wielkości fizycznych. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów wykazano, że AdaM osiąga równowagę między efektywnością redukcji danych a dokładnością. wspomniane wyżej podejście pozwala zmniejszyć ilość danych o 74%, zużycie energii co najmniej o 71%, jednocześnie zachowując dokładność danych na poziomie 89%.

Metoda przedstawiona w artykule [124] opiera się na uczeniu ze wzmocnieniem, gdzie częstotliwość próbkowania jest dynamicznie dostosowywana na podstawie analizy danych historycznych w czasie rzeczywistym, co eliminuje błędy spowodowane subiektywnymi czynnikami, które występują poza systemem. Jakość algorytmu jest silnie zależna od interwału próbkowania, który początkowo jest definiowany przez projektanta [125]. Ponadto, praca [126] podkreśla znaczenie odpowiedniego wyboru parametrów uczenia dla efektywności tej metody.

Choć próbkowanie adaptacyjne niesie ze sobą liczne korzyści, istnieje także szereg wad oraz wyzwania, które należy wziąć pod uwagę w przypadku implementacji wyżej omawianych metod. Wprowadzenie algorytmów próbkowania adaptacyjnego może wiązać się z komplikacjami wynikającymi z konieczności dostosowywania parametrów i algorytmów do konkretnego środowiska, co może okazać się procesem czasochłonnym. Niektóre algorytmy próbkowania adaptacyjnego mogą wymagać dodatkowych zasobów, takich jak pamięć operacyjna czy moc obliczeniowa, co może być istotnym problemem w przypadku węzłów o ograniczonych zasobach. Niektóre metody próbkowania adaptacyjnego mogą wprowadzać opóźnienia w zbieraniu danych, zwłaszcza gdy zachodzi konieczność implementacji wspomnianej metody w sieciach multi-hop [123].

#### 2.4.4 Predykcja danych

W celu wydłużenia czasu życia sieci sensorowej możliwe jest wykorzystanie modeli predykcyjnych. Mają one na celu wypracowanie decyzji czy aktualne odczyty pochodzące z czujników powinny być przesłane do węzła nadrzędnego, prowadząc tym samym do redukcji transmisji danych. Modele predykcyjne pozwalają na wprowadzanie algorytmów, których zadaniem jest selektywne przesyłanie danych zebranych przez węzły sensorowe [127–129]. Zgodnie z tym podejściem, do węzła nadrzędnego jest dostarczany pewien podzbiór danych. Podstawowym założeniem metody jest samodzielność węzłów sensorowych w podejmowaniu decyzji o przesłaniu swoich aktualnych pomiarów. W przypadku, gdy dane nie są przesyłane, węzeł odbiorczy podejmuje próbę ich zrekonstruowania. Jeśli błąd predykcji przekracza ustalony próg, wówczas węzeł wysyła swoje dane do węzła nadrzędnego. W przeciwnym wypadku dane nie są przesyłane, a węzeł odbierający wykorzystuje predykcję, traktując ją jako dokładną estymację pomiarów.

Przykładem rozwiązania, które wykorzystuje mechanizm predykcji jest liniowy algorytm predykcji [130]. Wspomniane podejście zakłada, że węzeł sensorowy przewiduje wartości odczytów czujników i dokonuje przesyłania danych jeżeli różnica między wartością przewidywaną, a rzeczywistą przekracza ustaloną wcześniej wartość. Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że metoda pozwala dostosować dokładność gromadzonych danych do konkretnych potrzeb.

Kolejnym przykładem omawianej koncepcji jest metoda *send-on-delta*, którą można zaliczyć do naiwnych metod predykcji [131]. Zgodnie z tą koncepcją, transmisja danych jest wykonywana, gdy odczyt czujnika różni się od ostatnio przesłanej próbki o wartość przekraczającą określony próg. Oznacza to, że węzeł sensorowy nie przesyła odczytów danych, dopóki oscylują one w granicy dopuszczalnego błędu, co pozytywnie wpływa na czas życia sieci sensorowej.



Dynamiczny wybór odpowiedniej wartości progowej dla strategii próbkowania *send-on-delta* przedstawiono w [132]. Algorytm ten pozwala obliczyć wartość progę, która umożliwi uzyskanie wymaganej średniej szybkości transmisji. Wspomniana technika znajduje zastosowanie w sytuacjach, gdy poszczególne pomiary wykazują pewną regularność lub powtarzalność.

### 2.4.5 Optymalizacja rozmieszczenia węzłów sensorowych

Optymalizacja rozmieszczenia węzłów sensorowych ma kluczowe znaczenie dla czasu życia sieci sensorowej. Odpowiednie rozlokowanie węzłów pozwala zoptymalizować zużycie ich zasobów energii poprzez ograniczenie ilości transmitowanych danych. Gdy węzły sensorowe są rozmieszczone zbyt gęsto, wówczas może dojść do interferencji sygnałów radiowych, a tym samym do błędów przesyłu danych oraz skrócenia czasu życia sieci. Optymalne rozmieszczenie węzłów sensorowych może również wpływać na koszty utrzymania sieci. Jeśli węzły są umieszczone w miejscach trudno dostępnych lub wymagających częstej konserwacji, koszty utrzymania mogą wzrosnąć. Pomijając aspekty związane z wydłużeniem czasu życia sieci, warto zauważyć, że implementacja wspomnianych technik pozwala na zwiększenie dokładności wykrywania występujących zdarzeń. Podczas rozmieszczenia węzłów sensorowych należy uwzględnić czynniki takie jak topologia sieci, charakterystyka środowiska oraz bariery wynikające z ograniczonej dostępności zasobów w węźle sensorowym.

W celu optymalizacji rozmieszczenia węzłów stosowane były algorytmy metaheurystyczne, które mogą znajdować rozwiązania optymalne lub bliskie optymalnym poprzez naśladowanie naturalnych zachowań lub procesów. Cechą wspomnianych algorytmów jest relatywnie prosta implementacja oraz akceptowalna złożoność obliczeniowa.

Przykładem podejścia metaheurystycznego jest algorytm GWO (*ang. Grey Wolf Optimizer*) [133], który naśladuje hierarchię przywództwa i mechanizm polowania wilków szarych. W pracy [134] zaproponowano optymalizację pokrycia monitorowanego obszaru węzłami sensorowymi, bazując na zmodyfikowanym algorytmie szarego wilka. Algorytm umożliwia uzyskanie wyższego wskaźnika pokrycia przy mniejszej liczbie węzłów oraz ogranicza koszty wdrożenia sieci. Wadą algorytmu jest podatność na znajdowanie minimów lokalnych [135].

W pracy [135] zaproponowano rozwiązanie wykorzystujące algorytm ewolucyjny oparty na mechanizmie zapylania kwiatów (*ang. flower pollination algorithm*) [136]. Problem optymalizacji rozmieszczenia węzłów jest modelowany jako wielokryterialny problem optymalizacyjny, który gwarantuje pokrycie punktów docelowych i zapewnia łączność sieci przy jednoczesnej minimalizacji energii, która będzie zużyta podczas przemieszczenia węzła sensorowego w wyznaczone przez algorytm miejsce. Wyniki badań pokazują, że zastosowanie omawianego podejścia cechuje się krótkim czasem zbieżności i wystarczającą dokładnością w porównaniu z innymi algorytmami ewolucyjnymi. Przeprowadzone eksperymenty wykazują, że proponowany algorytm może zagwarantować łączność sieci i spełnić wymóg pokrycia, przy jednoczesnej minimalizacji zużycia energii przez ruch czujników. W konsekwencji, większa ilość energii dostępnej w baterii

danego węzła może zostać wykorzystana do pozyskiwania i przesyłania danych sensorowych.

Kolejnym przykładem jest praca oparta na algorytmie ławicy ryb [137]. W celu eliminacji problemu losowego rozmieszczenia węzłów sensorowych wspomniana metoda uwzględnia zasięg sieci, wykorzystanie węzłów oraz średnie zużycie energii. Algorytm cechuje się dobrą zdolnością do znajdowania optimum globalnego kosztem wysokiej złożoności czasowej.

W pracy [138] w celu znalezienia optymalnych pozycji węzłów sensorowych wykorzystano algorytm centroidów. Stabilność algorytmu rozmieszczania węzłów została udowodniona poprzez analizę teoretyczną. Dzięki opracowanej metodzie możliwe jest osiągnięcie optymalnych wyników zapewniających pokrycie założonych obszarów.

Wspomniane wcześniej algorytmy mają dobrą zdolność do znajdowania globalnego optimum uwzględniając energię potrzebną do transmisji danych, jednak ignorują energię związaną z przemieszczaniem się węzłów. W przypadku sieci mobilnej często zachodzi potrzeba ponownego obliczania optymalnych pozycji węzłów, co może powodować znaczne zużycie zasobów mocy obliczeniowej i energii [135].

W celu poprawy zdolności wyszukiwania oraz uniknięcia problemu lokalnego optimum, wykorzystano rozkład Cauchy'ego oraz mechanizm perturbacji światła świętojańskiego [139]. Wyniki symulacji pokazują, że zaproponowane w pracy podejście poprawia zasięg bezprzewodowej sieci sensorowej i w porównaniu z innymi algorytmami pozwala bardziej równomiernie rozmieścić węzły sensorowe, co poprawia ogólną wydajność sieci.

## 2.5 Klasteryzacja oraz zmiana roli węzła

Typowe sieci sensorowe składają się z węzłów, które za pomocą czujników rejestrują parametry swojego otoczenia, a następnie przekazują odczyty do specjalnego węzła-bramy (ang. *sink*). W celu uzyskania użytecznej informacji, np. rozpoznania istotnych zdarzeń w pewnym obszarze, potrzebne jest zebranie i przeanalizowanie danych z wielu węzłów sensorowych.

Dzięki klasteryzacji możliwa jest redukcja energii potrzebnej do dostarczenia danych z wielu węzłów do stacji bazowej, jednak wymaga to zastosowania odpowiednich algorytmów wyboru i zmiany węzła nadrzędnego. Wynika to z faktu, że węzeł nadrzędny zużywa więcej energii od pozostałych węzłów w klastrze. W celu rozwiązania problemu klasteryzacji opracowano wiele algorytmów, a wybór konkretnego podejścia zależy od charakterystyki sieci [140].

W pracy [141] zaproponowano algorytm E-FUCA (ang. *Enhanced Fuzzy Clustering Algorithm*), który dokonuje klasteryzacji, bazując na logice rozmytej. Zgodnie z tym podejściem, węzły nie są przypisane jednoznacznie do jednego klastra, ale mają stopnie przynależności do różnych klastrów, co pozwala na bardziej elastyczne i dynamiczne zarządzanie klastrami w sieci. Wspomniana metoda wykorzystuje również logikę rozmytą do wyboru węzła następnego przeskoku aby rozwiązać problem trasowania (routingu). Dzięki użyciu logiki rozmytej uzyskano bardziej efektywne i energooszczędne trasy do stacji bazowej. Wyniki eksperymentalne potwierdzają lepszą wydajność E-FUCA w stosunku do porównywanych w pracy metod

oraz stabilności pracy sieci. Algorytm klasteryzacji może uwzględniać dodatkowe kryteria, takie jak minimalizacja zużycia energii, poprawa pokrycia obszaru czy niezawodność komunikacji między węzłami.

Kolejnym przykładem jest praca [142] w której problem klasteryzacji rozwiązano bazując na algorytmach ASFO (ang. *Adaptive SailFish Optimization*) oraz  $K$ -medoidów [143]. Podejście ASFO jest inspirowane naturą - algorytm naśladuje inteligentną strategię polowania żalglic. Proces klasteryzacji został podzielony na dwa etapy: proces formowania klastrów (metodą  $K$ -medoidów) oraz wybór węzłów nadrzędnych w powstałych klastrach (metodą ASFO). W początkowym etapie działania sieci węzły sensorowe rozmieszcza się losowo, co symuluje rzeczywiste rozproszenie sensorów na danym obszarze. Następnie, węzły sensorowe dzieli się na kilka klastrów, gdzie każdy z nich zawiera węzły o zbliżonych pozycjach. Pierwszy węzeł nadrzędny jest wybierany losowo spośród dostępnych medoidów. Każdy węzeł podrzędny wyznacza swoje współrzędne w odniesieniu do przypisanego mu węzła nadrzędnego. Węzeł nadrzędny oblicza odległości między węzłami w klastrze a medoidem. Algorytm ASFO pomaga w dynamicznym dostosowywaniu pozycji węzłów nadrzędnych oraz w optymalizowaniu zużycia energii i komunikacji wewnątrz klastra.

W pracy [144] w celu rozwiązania problemu klasteryzacji wykorzystano algorytmu CSA (ang. *Cuckoo Search Algorithm*), który odwzorowuje zachowanie gatunków kukułek, składających swoje jaja w gniazdach innych ptaków. Na potrzeby algorytmu rozróżnia się gniazda, które reprezentują rozwiązanie problemu, czyli potencjalne zestawy węzłów nadrzędnych oraz jajka, które oznaczają nowe rozwiązania generowane w trakcie procesu optymalizacji. Metoda opiera się na wyznaczeniu wartości metryki, która uwzględnia takie parametry jak pozostała energia, odległość do innych węzłów oraz liczbę węzłów w klastrze. W kolejnym kroku dokonuje się sortowania wszystkich węzłów w porządku malejącym względem wartości wyznaczonej metryki. Następnie, 20% węzłów, dla których metryka osiąga najwyższą wartość, kandyduje do objęcia roli węzła nadrzędnego. Wyznaczone rozwiązanie jest oceniane pod kątem średniej odległości pomiędzy węzłami podrzędnymi a nadrzędnymi w klastrze oraz stosunku energii wszystkich węzłów w sieci do energii węzłów nadrzędnych. Jeśli nowe rozwiązanie (jajko) jest lepsze od obecnego rozwiązania (gniazdo), to zastępuje ono to gniazdo. Algorytm CSA jest ceniony ze względu na swoją prostotę i efektywność w przeszukiwaniu przestrzeni rozwiązań [145, 146].

Istnieje szereg protokołów komunikacyjnych dla sieci sensorowych, które uwzględniają zmianę roli węzła nadrzędnego, lecz w większości przypadków zmiana jest dokonywana po predefiniowanym czasie. Czasowa zmiana roli węzła jest nieoptymalna w przypadku, gdy węzły przesyłają dane niedeterministycznie. Bardziej efektywnym podejściem jest zastosowanie procedury zmiany węzła nadrzędnego, która uwzględnia energię zużytą przez węzeł podczas realizacji jego zadań. Taki sposób zmiany węzła nadrzędnego może być problematyczny podczas implementacji. Jest to związane z potrzebą monitorowania zużycia energii przez węzeł praktycznie cały czas po dołączeniu węzła do sieci. Metody te wymagają więc nie tylko większej mocy obliczeniowej, lecz także zwiększają one ogólny koszt budowy węzła. W wyniku prze-

---

glądu literatury stwierdzono, że wciąż brakuje algorytmów, które pozwalałyby zapewnić długi czas życia rozpatrywanych sieci. Szczegółowa dyskusja ograniczeń dostępnych algorytmów tego rodzaju została zamieszczona w kolejnym rozdziale.

## Rozdział 3

# Istniejące algorytmy wyboru węzła nadrzędnego

W literaturze zaproponowano dotychczas szereg metod, których celem jest wydłużenie czasu życia bezprzewodowej sieci sensorowej poprzez odpowiedni wybór węzła sensorowego, który w danym czasie pełni rolę węzła nadrzędnego. W niniejszym rozdziale dokonano przeglądu metod doboru roli węzłów.

Najprostszą metodą organizacji przesyłania danych jest transmisja bezpośrednia. Metoda ta zakłada, że wszystkie węzły sensorowe pełnią tę samą rolę i ich zadaniem jest wysyłanie zebranych danych bezpośrednio do stacji bazowej [33]. Przy takich założeniach nie ma podziału sieci na klastry i co się z tym wiąże brak jest wyróżnienia roli węzła nadrzędnego. Jak wyjaśniono w rozdziale 1, bezpośrednia transmisja wszystkich zarejestrowanych danych do stacji bazowej skutkuje wysokim zużyciem energii oraz krótkim czasem życia węzłów sensorowych. Ponadto, metoda transmisji bezpośredniej ma niską skalowalność. Jest to związane m.in. z działaniem stacji bazowej, która w takim wariantcie musi zbierać i przetwarzać duże porcje danych ze wszystkich węzłów sensorowych. Jeżeli obciążenie stacji bazowej jest zbyt duże, dane pochodzące z węzłów sensorowych mogą zostać utracone. Złożoność tej metody jest niska, a jej realizacja sprzętowa bardzo prosta. Jednak wspomniane wyżej wady sprawiają, że metoda jest bardzo rzadko stosowana w praktyce.

Ograniczenia dotyczące transmisji bezpośredniej spowodowały rozwój bardziej zaawansowanych metod zbierania danych, które uwzględniają podział węzłów w sieci sensorowej na klastry. Metody te pozwalają zmniejszyć liczbę transmisji danych do stacji bazowej oraz zredukować zużycie energii węzłów sensorowych. Węzły należące do klastra przesyłają dane do węzła nadrzędnego, który w kolejnym kroku dokonuje ich agregacji, następnie przesyła je do stacji bazowej lub węzła nadrzędnego innego klastra. Jak wspomniano we wprowadzeniu (rozdział 1), rola węzła nadrzędnego musi być przekazywana pomiędzy węzłami w celu zrównoważenia zużycia energii i uniknięcia sytuacji, w której węzeł pełniący rolę nadrzędną przez dłuższy czas szybko wyczerpałby własne zasoby energii.

Dostępne algorytmy zmiany węzła nadrzędnego można podzielić na dwie kategorie. Pierwsza kategoria obejmuje algorytmy czasowe. Zgodnie z tymi algorytmami węzły sensorowe pełnią rolę nadrzędną przez określony czas. Do drugiej kategorii należą algorytmy, które biorą pod uwagę poziom zużytej lub dostępnej energii w węźle. Przykładem jest algorytm, zgodnie z którym zmiana roli węzła następuje po przekroczeniu predefiniowanego progu zużycia energii.

### 3.1 Zmiana węzła nadrzędnego na podstawie upływu czasu

Rozproszony algorytm organizacji węzłów sensorowych w klastry został zaimplementowany w hierarchicznym protokole routingu LEACH (ang. *Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) [14]. Zgodnie z tym podejściem rola węzła nadrzędnego jest przekazywana pomiędzy węzłami, aby nie dopuścić do nadmiernego zużycia energii pojedynczego węzła. Nowy węzeł nadrzędny jest wybierany po pewnym czasie, który jest z góry określony. Do zadań węzła nadrzędnego należy tworzenie harmonogramu TDMA (ang. *Time Division Multiple Access*) w celu zapewnienia dostępu do medium transmisyjnego wielu węzłom podrzędnym. Każdy węzeł podrzędny przesyła zatem dane w przedziałach czasowych przydzielonych przez węzeł nadrzędny. Węzeł nadrzędny zbiera dane, a następnie wysyła je do stacji bazowej. Działanie protokołu LEACH jest podzielone na rundy, z kolei każda runda składa się z dwóch faz: fazy konfiguracji i przesyłania. W fazie konfiguracji następuje zmiana roli węzła nadrzędnego, a następnie rozsyłane są dane z informacją dotyczącą ról poszczególnych węzłów. W fazie przesyłania rozpoczyna się właściwa transmisja danych - węzły sensorowe przesyłają swoje dane do węzła nadrzędnego zgodnie z przydzielonymi slotami. LEACH pozwala węzłom nadrzędnym na lokalną agregację danych w każdym klastrze, celem zmniejszenia liczby wiadomości przesyłanych do stacji bazowej.

Zmodyfikowaną, scentralizowaną wersją omawianego wcześniej podejścia jest protokół LEACH-C [147]. We wspomnianym protokole przyjęto założenie, że każdy węzeł przesyła do stacji bazowej informacje o swojej aktualnej lokalizacji oraz poziomie pozostałej energii. Na tej podstawie obliczana jest średnia ilość energii w węzle, co jest wykorzystywane w procesie klasteryzacji (wyboru węzłów nadrzędnych). Następnie realizowany jest proces klasyfikacji węzłów, polegający na odrzuceniu węzłów, których pozostała energia jest niższa od wyznaczonej we wcześniejszym kroku średniej. Odrzucone węzły nie będą mogły pełnić roli węzła nadrzędnego w bieżącej rundzie, jednak będą mogły przesyłać dane do wyznaczonego węzła nadrzędnego. Metoda ta ma na celu równomierne rozłożenie węzłów nadrzędnych w całej sieci. Podejście scentralizowane wymaga realizacji dodatkowych transmisji danych oraz złożonej procedury grupowania, którą musi wykonać stacja bazowa. Podobnie jak w przypadku LEACH, algorytm LEACH-C zakłada, że węzły niezależnie od odległości do stacji bazowej przesyłają do niej dane w sposób bezpośredni (bez udziału węzłów pośredniczących), co może skrócić czas życia węzłów pełniących funkcję węzła nadrzędnego.

Kolejną modyfikacją protokołu LEACH jest LEACH-D [148], który zakłada przekazanie roli węzła nadrzędnego pomiędzy węzłami sąsiadującymi ze sobą. Proces wyboru węzła nadrzędnego jest realizowany po zakończeniu inicjalizacji sieci. Na koniec każdej rundy najbliższy sąsiad dotychczasowego węzła nadrzędnego wybierany jest jako nowy węzeł nadrzędny, pod warunkiem, że poziom jego energii jest większy niż przyjęty próg. W przeciwnym razie ten sam warunek jest weryfikowany dla następnego najbliższego sąsiada. W przypadku, gdy nie ma sąsiedniego węzła o dostępnej energii większej niż próg, wówczas rolę nowego węzła nadrzędnego

przejmuje węzeł, który znajduje się najbliżej aktualnego węzła nadrzędnego.

Stały podział węzłów na klastry jest założeniem kolejnego wariantu protokołu LEACH. W podejściu LEACH-F [149] klastry są tworzone jednorazowo, przy użyciu scentralizowanego algorytmu klasteryzacji, który jest stosowany w LEACH-C. Węzły sensorowe w klastrze są numerowane, a rola węzła nadrzędnego jest przekazywana pomiędzy nimi zgodnie z zasadą działania algorytmu karuzelowego. Oznacza to, że pierwszy węzeł sensorowy jest węzłem nadrzędnym w pierwszej rundzie, drugi węzeł realizuje zdania węzła nadrzędnego w drugiej rundzie, itd. Jeżeli w danej rundzie rolę węzła nadrzędnego pełnił węzeł o najwyższym numerze, to w kolejnej rundzie tę rolę ponownie przejmuje węzeł pierwszy. Takie rozwiązanie eliminuje potrzebę komunikacji podczas wyboru węzła nadrzędnego na początku każdej rundy, nie jest odpowiednie dla sieci, w której dynamicznie zmienia się topologia (np. sieci węzłów mobilnych).

W protokole HEED (ang. *Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering*) [150] nowe węzły nadrzędne są również wybierane po upływie z góry określonego czasu trwania jednej rundy. Takie rozwiązanie jest podobne do działania opisanego powyżej protokołu LEACH, jednak w przypadku protokołu HEED węzeł nadrzędny jest wybierany z uwzględnieniem pozostałej energii. Dla każdego węzła sensorowego prawdopodobieństwo przejścia roli nadrzędnej jest proporcjonalne do poziomu dostępnej energii. Stosowana jest rozproszona procedura wyboru węzła nadrzędnego, która wymaga jedynie lokalnych informacji dotyczących sąsiednich węzłów. Niemniej jednak, wiąże się ona z dodatkowym wydatkiem energii podczas wymiany danych pomiędzy węzłami.

Kolejną metodą zmiany roli węzła nadrzędnego w klastrze jest ANTCLUST [151]. W metodzie tej, węzeł nadrzędny jest wybierany na początku każdej rundy, tak jak w poprzednich podejściach. W celu poprawy czasu życia sieci algorytm wybiera nowy węzeł nadrzędny w zależności od poziomu naładowania baterii i odległości do sąsiednich węzłów sensorowych. Specyficzną cechą omawianej metody jest zastosowanie algorytmu klasteryzacji opartego na inspirowanym naturą modelu kolonii mrówek.

Interesujące podejście zaproponowano w protokole SEP (ang. *Stable Election Protocol*) [152], który został opracowany z myślą o heterogenicznych sieciach sensorowych, w których węzły sensorowe mają różne początkowe poziomy energii. Zgodnie protokołem SEP nowe węzły nadrzędne wybierane są losowo na początku każdej rundy, tak jak w LEACH. Zaletą tego protokołu jest to, że węzły sensorowe o wyższym poziomie dostępnej energii częściej stają się węzłami nadrzędnymi w porównaniu do reszty węzłów o niższych zasobach energetycznych. Takie podejście wydłuża czas, po którym nastąpi rozładownie pierwszego z węzłów.

Odmianą wcześniej omawianego protokołu jest Prolong-SEP (P-SEP) [153]. Został on opracowany z myślą o wydłużeniu czasu życia sieci sensorowych, które działają w oparciu o przetwarzaniu danych we mgle (ang. *fog-computing*). Algorytm dąży do równoważenia zużycia energii we wszystkich węzłach, aby sumarycznie czas życia sieci był jak najdłuższy. Węzły o poziomie energii powyżej ustalonego progu są nominowane jako kandydaci do objęcia roli węzła nadrzędnego, a następnie węzeł nadrzędny jest losowo wybierany spośród kandydatów,

przy czym brana jest pod uwagę ich odległość do pozostałych węzłów. Należy zauważyć, że zarówno w algorytmie SEP, jak i P-SEP, wybór węzła nadrzędnego jest elementem złożonej procedury klasteryzacji. Z tego powodu SEP i jego pochodna wersja mogą być nieefektywne gdy istnieje potrzeba częstych zmian roli węzłów w sieci.

Kolejnym rozwiązaniem jest protokół HEER (ang. *Hamilton Energy-Efficient Routing Protocol*) [154]. HEER wykorzystuje algorytm zachłanny do konstruowania ścieżki Hamiltona pomiędzy węzłami sensorowymi w każdym klastrze. Ścieżka ta jest wykorzystywana do realizacji operacji przesyłania danych. Węzły sieci sensorowej, które znajdują się na ścieżce pełnią kolejno rolę węzła nadrzędnego. Podobnie jak w przypadku innych, wspomnianych powyżej metod, zmiana roli węzła nadrzędnego następuje po wcześniej ustalonym czasie.

## 3.2 Zmiana węzła nadrzędnego na podstawie zużycia energii

Metoda klasteryzacji, która uwzględnia zużycie energii węzła została zastosowana w algorytmie EDAC (ang. *Energy-Distance Aware Clustering method*) [155]. Zgodnie z tą metodą, węzeł nadrzędny w klastrze jest wybierany na podstawie dwóch parametrów: pozostałej energii w węźle oraz energii, która będzie wykorzystana, aby przesłać dane z węzłów do potencjalnego węzła nadrzędnego. Na podstawie wyżej wymienionych parametrów tworzona jest metryka, która pozwala uzyskać równomierne zużycie energii węzłów sensorowych. Wykorzystując wspomnianą metrykę, wyznacza się moment zmiany węzła nadrzędnego.

W przypadku algorytmu klasteryzacji E-DACS (ang. *Energy-Distance Aware Clustering Scheme for wireless sensor networks*) [156] zmiana roli węzła realizowana jest z uwzględnieniem pozostałej energii w węźle, wzajemnej odległości pomiędzy węzłami oraz odległości do stacji bazowej. Wybór nowego węzła nadrzędnego jest dokonywany okresowo, gdy poziom energii dotychczasowego węzła nadrzędnego spadnie poniżej energii jakiegokolwiek innego węzła sensorowego w klastrze.

Kolejnym algorytmem przekazywania roli węzła nadrzędnego jest EDCR (ang. *Energy-Driven Cluster-head Rotation*) [157]. Działanie algorytmu opiera się na względnym poziomie pozostałej energii w węzłach w danym klastrze. Węzeł sensorowy o najwyższym poziomie energii staje się węzłem nadrzędnym. Dynamicznie wyznaczany próg jest wykorzystywany do wyzwolenia procedury przekazania roli węzła. Próg jest wyznaczony według wzoru:  $P \cdot EC$ , gdzie  $0 < P < 1$  jest stałą, a  $EC$  jest pozostałą energią w węźle. Parametr  $EC$  jest mierzony w momencie, gdy węzeł jest wybierany jako węzeł nadrzędny. W tej metodzie wybór nowego węzła nadrzędnego następuje, gdy pozostała energia w dotychczasowym węźle nadrzędnym spada poniżej wartości progowej. Zgodnie z tym algorytmem, im niższy poziom dostępnej energii w węzłach, tym częściej następuje zmiana roli węzła nadrzędnego. Taka strategia ma na celu zrównoważenie zużycia energii węzłów sensorowych. Rozszerzeniem algorytmu EDCR jest algorytm EDCR-MH



[158], który został dostosowany do wymagań sieci, gdzie dane muszą być przekazane przez wiele węzłów, zanim dotrą do stacji bazowej (skrót MH w nazwie tego algorytmu oznacza transmisję *multi-hop*).

Opisane powyżej, dotychczas stosowane metody, mają istotne wady. Pierwsza wada wynika z przyjęcia założenia, że wszystkie węzły sensorowe w klastrze przesyłają swoje dane pochodzące z czujników regularnie, w równych odstępach czasu. Należy jednak zauważyć, że każdy węzeł może przesyłać dane z różną częstotliwością, w wybranych krokach pracy sieci, np. pomijając dane nadmiarowe lub nieistotne. Oznacza to, że zużycie energii przez węzły zmienia się dynamicznie i może znacznie różnić się między węzłami. Istniejące metody mogą okazać się nieskuteczne w wydłużaniu czasu życia sieci, ponieważ nie uwzględniają różnic w zużyciu energii przez poszczególne węzły.

Proponowane w niniejszej pracy rozwiązanie przekazywania roli węzła nadrzędnego uwzględnia prawdopodobieństwo przesłania danych przez węzły sensorowe. Wiedza o prawdopodobieństwie transmisji danych z poszczególnych węzłów umożliwia bardziej dokładne szacowanie zużycia energii i zarządzanie zasobami energii dostępnymi w sieci.

Kolejna wada dostępnych dotychczas metod wynika z braku uwzględnienia różnych definicji czasu życia. W związku z powyższym, istniejące algorytmy mogą okazać się nieodpowiednie w przypadku specyficznych wymagań, np. gdy należy wydłużać czas do rozładowania wszystkich węzłów.

Ponadto, metody znane w literaturze nie pozwalają na uwzględnienie parametrów opisujących zużycie energii, zależnych od zastosowanej w danej sieci technologii transmisji radiowej. W proponowanej metodzie wprowadzono parametry modelu zużycia energii, których wartość może być ustalona na podstawie znanej charakterystyki użytych rozwiązań sprzętowych (w tym modułów radiowych). Parametry te pozwalają przewidywać zużycie energii i czas życia węzłów z większą dokładnością oraz odpowiednio wybierać węzeł nadrzędny, aby wydłużyć czas życia sieci.

## Rozdział 4

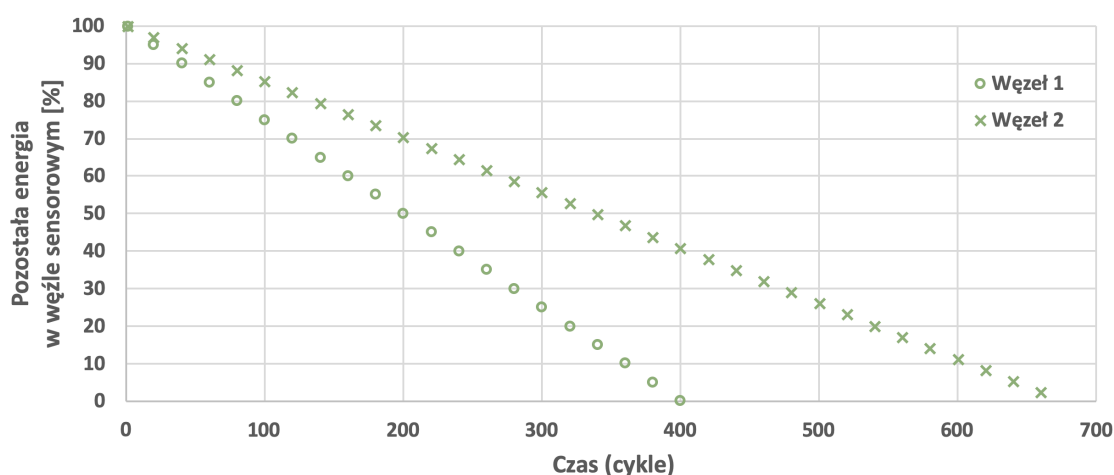
# Proponowane algorytmy

W niniejszym rozdziale przedstawiono proponowane, autorskie algorytmy wyboru i zmiany węzła nadrzędnego dla dwóch rozpatrywanych definicji czasu życia sieci sensorowej.

### 4.1 Wydłużanie czasu do rozładowania jednego węzła

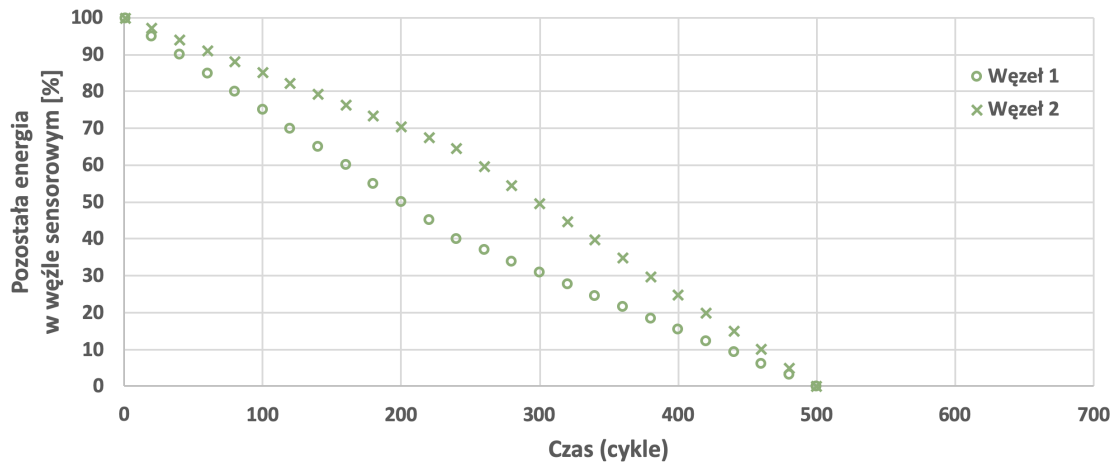
Pierwsza zaproponowana metoda ma na celu wydłużanie czasu do rozładowania jednego węzła w sieci sensorowej, opisanego wzorem 1.1 ( $LT_O$ ).

Problem wydłużenia czasu do rozładowania jednego węzła dla sieci składającej się z dwóch węzłów sensorowych został przedstawiony na rys. 4.1, 4.2, 4.3 oraz 4.4. Przykłady zilustrowane na rys. 4.1 oraz 4.2 zakładają, że oba węzły mają ten sam początkowy poziom energii (energia = 100% dla czasu = 0). W przykładzie pokazanym na rys. 4.1 rozważane jest statyczne przypisanie roli węzła nadrzędnego. We wskazanym przypadku węzeł 1 przyjmuje rolę węzła nadrzędnego dla całego analizowanego okresu. W ten sposób pozostała energia w węźle pierwszym spada szybciej niż energia węzła 2. W rezultacie węzeł pierwszy rozładowuje baterię po 400 cyklach, podczas gdy drugi węzeł ma jeszcze 40 jednostek energii (należy zauważyć, że czas na omawianych rysunkach wyrażony jest w cyklach pracy węzła sensorowego). Czas życia sieci w tym przypadku wynosi 400 cykli. W niniejszym rozdziale czas życia sieci wyraża się w cyklach. Liczba cykli może być interpretowana jako liczba rund, która jest szczegółowo omówiona w dalszej części pracy.



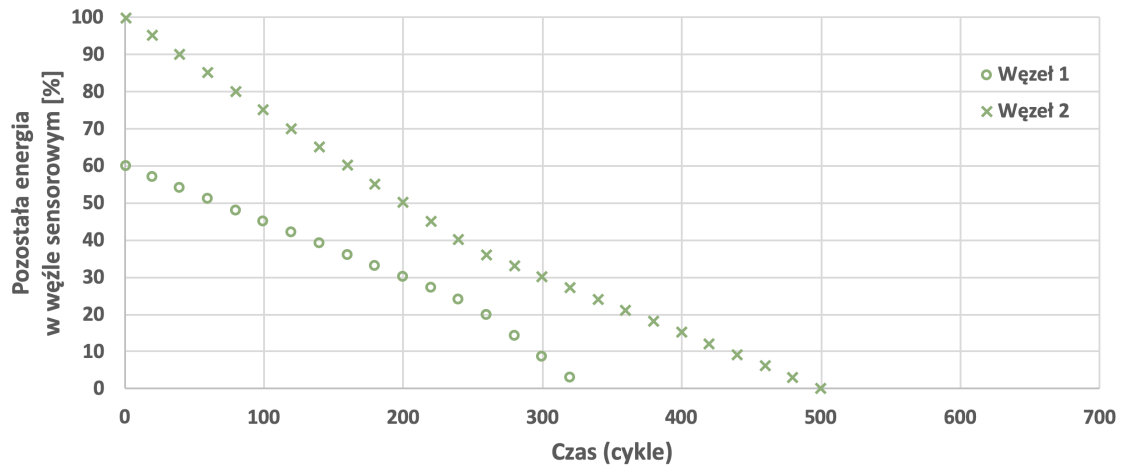
Rys. 4.1: Przykład zużycia energii przez węzły sensorowe bez przekazywania roli węzła nadrzędnego, dla jednakowego poziomu energii początkowej ( $LT_O = 400$ ).

Kolejny przykład, przedstawiony na rys. 4.2, pokazuje, że czas życia sieci można wydłużyć poprzez zmianę węzła sensorowego, który przejmuje rolę węzła nadrzędnego. W tym przypadku pierwszy węzeł przyjmuje rolę węzła nadrzędnego dla cykli 0-249, a następnie rolę węzła nadrzędnego przejmuje kolejny węzeł. Oba węzły sensorowe wyczerpują swoją energię w tym samym czasie tj. po 500 cyklach. Należy zauważyć, że czas życia jest zauważalnie wydłużony, gdy oba węzły sensorowe rozładują swoje zasoby energetyczne w tym samym czasie [159].

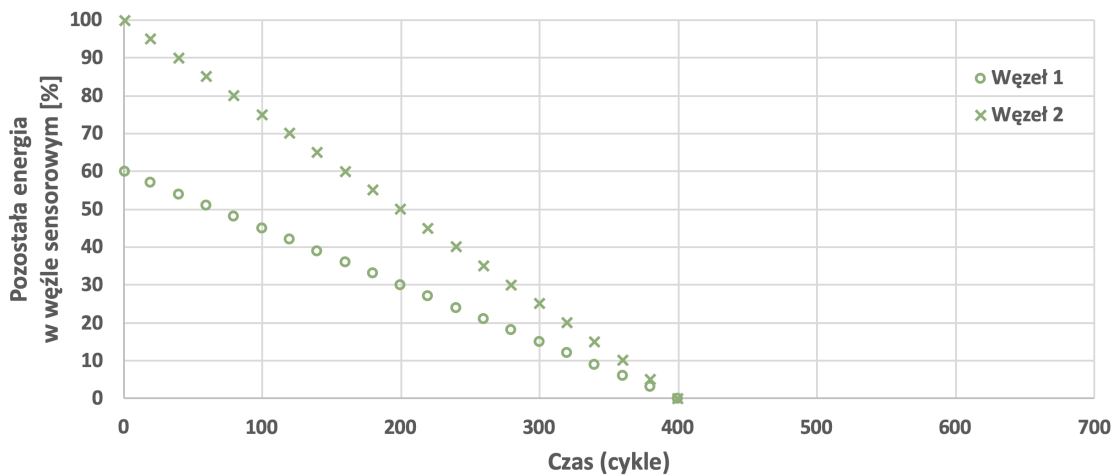


Rys. 4.2: Przykład zużywania energii przez węzły sensorowe z przekazywaniem roli węzła nadrzędnego, dla jednakowego poziomu energii początkowej ( $LT_O = 500$ ).

Czas życia sieci sensorowej dla różnych początkowych poziomów energii węzłów sensorowych jest analizowany na rys. 4.3 oraz 4.4. W tym przypadku, dla pierwszego węzła, początkowa energia wynosi 100 jednostek dla pierwszego węzła sensorowego oraz 60 jednostek dla drugiego węzła. Rysunek 4.4 pokazuje, że bez przekazywania roli węzła nadrzędnego (pierwszy węzeł pełni wspomnianą rolę) oba węzły rozładują się po 400 cyklach pracy sieci. Na tej podstawie możliwe jest wyciągnięcie wniosku, że dla wyżej wymienionych poziomów energii początkowej, czas życia sieci wynosi 400 cykli. Na rysunku 4.3. przedstawiono sytuację w której zmiana węzła nadrzędnego po 250 cyklach powoduje zmniejszenie czasu życia sieci, ponieważ węzeł 2 w tym przypadku zużył swoją energię w 330 cyklu.



Rys. 4.3: Przykład zużywania energii przez węzły sensorowe z przekazywaniem roli węzła nadrzędnego, dla różnych poziomów energii początkowej ( $LT_O = 330$ ).



Rys. 4.4: Przykład zużywania energii przez węzły sensorowe bez przekazywania roli węzła nadrzędnego, dla różnych poziomów energii początkowej ( $LT_O = 400$ ).

Analizując przedstawione przykłady działania sieci można zauważyć, że czas życia sieci jest wydłużany, jeśli oba węzły zużyją swoje zasoby energii w tym samym czasie. Taka obserwacja jest również potwierdzona wnioskami z powiązanych prac, np. [160–162], gdzie rozważano bardziej złożone scenariusze, niż te omówione powyżej. Dlatego też możliwe jest sformułowanie ogólnej zasady, że zużycie energii przez węzły sensorowe musi być nieustannie równoważone, aby wydłużyć czas  $LT_O$ .

Przewidywany czas życia  $i$ -tego węzła sieci sensorowej może być szacowany jako  $EI_i/e_i$ , gdzie  $EI_i$  oznacza początkowy poziom energii  $i$ -tego węzła, a  $e_i$  jest średnią energią zużywaną w jednym cyklu pracy sieci przez  $i$ -ty węzeł sensorowy. Przykładowo na rysunku 4.2  $e_1 = e_2 = 0,20$ , natomiast w przypadku rysunku 4.4  $e_1 = 0,25$  i  $e_2 = 0,15$ . W związku z tym, aby wydłużyć czas życia, musi być spełniony następujący warunek:

$$\frac{EI_1}{e_1} = \frac{EI_2}{e_2} \quad (4.1)$$

Przyjmijmy, że  $t_i \in [0, 1]$  określa przez jaką część czasu  $T$  węzeł  $i$  pełni rolę nadrzędną. Średnie zużycie energii ( $e_i$ )  $i$ -tego węzła sensorowego w okresie  $T$  może być wówczas wyrażone następującym wzorem:

$$e_i = EH \cdot t_i + EM \cdot (1 - t_i), \quad (4.2)$$

gdzie  $EH$  oznacza energię zużywaną podczas jednego kroku pracy przez węzeł sensorowy, który pełni rolę nadrzędną natomiast  $EM$  energię zużywaną podczas jednego kroku pracy przez węzeł sensorowy, który pełni rolę podrzędną.

W rozpatrywanej sieci zużycie energii przez węzeł podrzędny przyjmuje różne wartości, w zależności od tego czy w danym kroku węzeł podrzędny przesyła dane do węzła nadrzędnego. Z tego powodu, w proponowanym podejściu energia  $EM$  jest szacowana z uwzględnieniem prawdopodobieństwa transmisji dla  $i$ -tego węzła sensorowego  $p_i$  według wzoru:

$$EM = EMH \cdot p_i + EML \cdot (1 - p_i), \quad (4.3)$$

gdzie  $EMH$  oznacza energię zużywaną przez węzeł podrzędny podczas kroku pracy, w którym zrealizowano operację przesłania danych,  $EML$  oznacza zużycie energii przez węzeł podrzędny podczas kroku, w którym transmisja nie jest realizowana. Prawdopodobieństwo transmisji  $p_i$  jest szacowane na podstawie danych historycznych. Podczas analizy przedstawionych wyżej wzorów należy wziąć pod uwagę, że dotyczą one pracy węzłów w jednej rundzie działania sieci. W szczególności przyjmuje się, że prawdopodobieństwa transmisji  $p_i$  są stałe w trakcie trwania jednej rundy.

Podział czasu pełnienia roli nadrzędnej pomiędzy poszczególne węzły określony jest za pomocą zmiennych  $t_i \in [0, 1]$ ,  $i = 0, \dots, n - 1$ , których wartości muszą być starannie dobrane, aby wydłużyć czas życia sieci. Zgodnie z zaproponowaną metodą, wartości  $t_i$  są wyznaczone poprzez rozwiązanie następującego układu równań liniowych:

$$\begin{cases} \frac{EI_i}{e_i} = \frac{EI_{i+1}}{e_{i+1}}, & i = 0, \dots, n - 1 \\ \sum_{i=1}^n t_i = 1 \end{cases} \quad (4.4)$$

gdzie  $n$  jest liczbą węzłów sensorowych w klastrze.

Czas, przez który  $i$ -ty węzeł sensorowy powinien pełnić rolę nadrzędną jest obliczany jako  $TCH_i = T \cdot t_i$ , gdzie  $T$  jest predefiniowanym okresem. Zaproponowany algorytm pozwala odpowiednio podzielić okres  $T$  na przedziały czasu, w których poszczególne węzły sensorowe w klastrze będą pełniły rolę nadrzędną. Długość okresu  $T$  może zostać dobrana eksperymentalnie. W sytuacji, gdy okres  $T$  będzie zbyt krótki, wówczas działanie algorytmu daje rezultaty

zbliżone do metody LEACH. W przypadku, gdy okres  $T$  jest zbyt długi, wówczas algorytm nie może szybko adaptować się do zmian prawdopodobieństwa transmisji danych przez węzły, co prowadzi do skrócenia czasu życia sieci.

## 4.2 Wydłużanie czasu do rozładowania wszystkich węzłów

Druga zaproponowana metoda ma na celu wydłużanie czasu do rozładowania wszystkich węzłów w sieci sensorowej ( $LT_A$ ), opisanego wzorem 1.2.

W dotychczasowych rozwiązaniach sieci sensorowych, w których dane są pozyskiwane do momentu rozładowania wszystkich węzłów, rolę węzła nadrzędnego przypisuje się do węzła, który ma nadawany arbitralnie najniższy identyfikator. Po jego rozładowaniu rolę węzła nadrzędnego przekazuje się do kolejnego węzła, zgodnie z rosnącym porządkiem identyfikatorów, aż do rozładowania wszystkich węzłów. Jeżeli węzły transmitują dane nieregularnie i zużywają energię w różnym tempie, wówczas arbitralne przypisanie identyfikatorów nie gwarantuje wydłużenia czasu życia. Z tego powodu istnieje potrzeba opracowania metody, która pozwoli wyznaczyć identyfikatory węzłów, determinujące kolejność ich rozładowania, w taki sposób, aby osiągnąć najdłuższy czas życia sieci. Zostało to osiągnięte dzięki zaproponowaniu metody, która uwzględnia liczbę transmisji realizowanych przez poszczególne węzły i energię początkową węzłów.

Problem wydłużenia czasu życia, definiowanego jako czas do rozładowania wszystkich węzłów, zilustrowano na rysunkach 4.5 - 4.8. Przedstawione na wskazanych rysunkach przykłady dotyczą sieci składającej się z dwóch węzłów.

Przyjmijmy, że symbol  $i$  oznacza identyfikator węzła, który pełni rolę węzła nadrzędnego jako pierwszy, natomiast  $j$  jest identyfikatorem węzła, który przejmuje rolę nadrzędną jako drugi (po rozładowaniu węzła  $i$ ). Ponadto, załóżmy, że jednostką czasu jest czas trwania jednego kroku pracy węzła. Czas do rozładowania węzła  $i$  można wyznaczyć jako:

$$T_1 = \frac{EI_i}{EH}, \quad (4.5)$$

gdzie  $EI_i$  jest energią początkową węzła  $i$ , a  $EH$  jest energią zużywaną w jednym kroku (ilością energii zużywaną w jednostce czasu), w przypadku, gdy węzeł pełni rolę nadrzędną. Po czasie  $T_1$  energia węzła  $j$  wyniesie:

$$E_j(T_1) = EI_j - \frac{EI_i}{EH} \cdot EM_j, \quad (4.6)$$

gdzie  $EI_j$  jest energią początkową węzła  $j$ , a  $EM_j$  jest energią zużywaną w danym kroku (w jednostce czasu) przez węzeł  $j$ , gdy pełni on rolę podrzędną. Załóżmy, że węzeł  $j$  będzie pełnił rolę węzła nadrzędnego do momentu rozładowania, a więc przez czas:

$$T_2 = \frac{E_j(T_1)}{EH} = \frac{EI_j}{EH} - \frac{EI_i \cdot EM_j}{EH^2}. \quad (4.7)$$

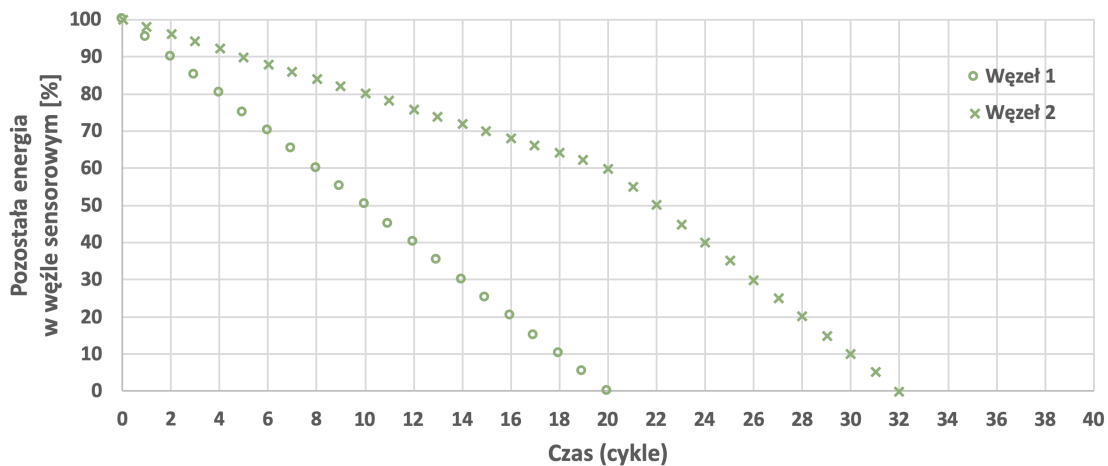
W związku z powyższym, dla analizowanego przypadku czas życia sieci ( $LT_A$ ) możemy opisać za pomocą wzoru:

$$LT_A = T_1 + T_2 = \frac{EI_i + EI_j}{EH} - \frac{EI_i \cdot EM_j}{EH^2}. \quad (4.8)$$

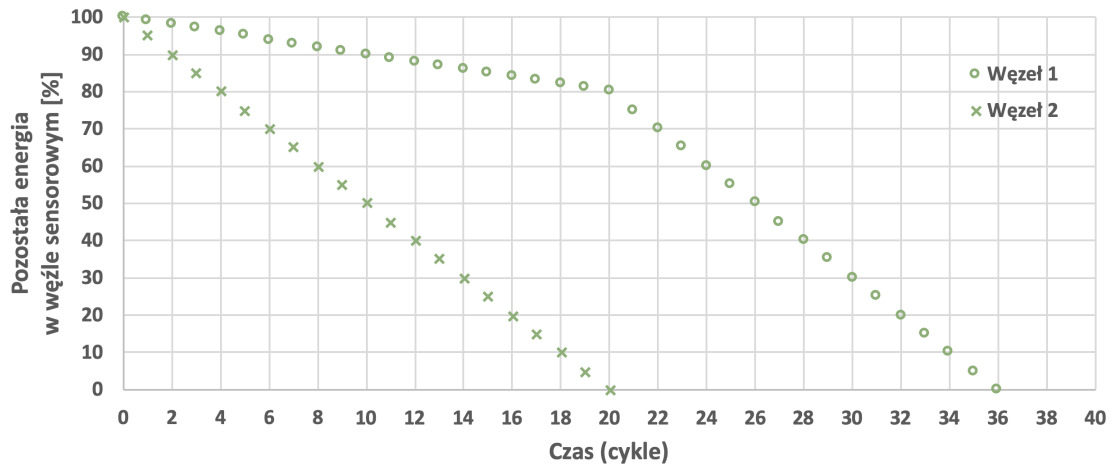
Należy zauważyć, że wybierając węzeł  $i$  nie zmieniamy wartości sumy  $EI_i + EI_j$ , jak również nie zmieniamy wartości  $EH$ . Zatem, żeby wydłużyć czas  $LT_A$ , należy tak ustalić kolejność pełnienia roli nadrzędnej przez węzły sensorowe (wybrać węzeł  $i$ , który jako pierwszy pełni rolę nadrzędną), aby:

$$EI_i \cdot EM_j \rightarrow \min. \quad (4.9)$$

Na podstawie wzoru (4.9) możemy stwierdzić, że jako węzeł  $i$  powinien zostać wybrany węzeł o najmniejszej energii początkowej. Ponadto, ze wzoru (4.9) wynika, że jako węzeł  $j$  należy wybrać węzeł, który zużywa najmniej energii, gdy pełni rolę węzła podrzędnego. W sposób oczywisty, zwłaszcza dla przykładu sieci składającej się z dwóch węzłów, wybór węzła  $j$  jest związany z wyborem węzła  $i$ . Dlatego, modyfikując sformułowaną wyżej regułę wyboru węzła  $j$ , możemy przyjąć, iż węzłem  $i$  powinien być ten z węzłów, który zużywa najwięcej energii pełniąc rolę podrzędną. Z kolei ilość energii zużywana przez węzeł podrzędny jest proporcjonalna do prawdopodobieństwa transmisji, zatem zgodnie z powyższą regułą, węzłem  $i$  powinien być węzeł, dla którego prawdopodobieństwo transmisji danych przyjmuje najwyższą wartość.

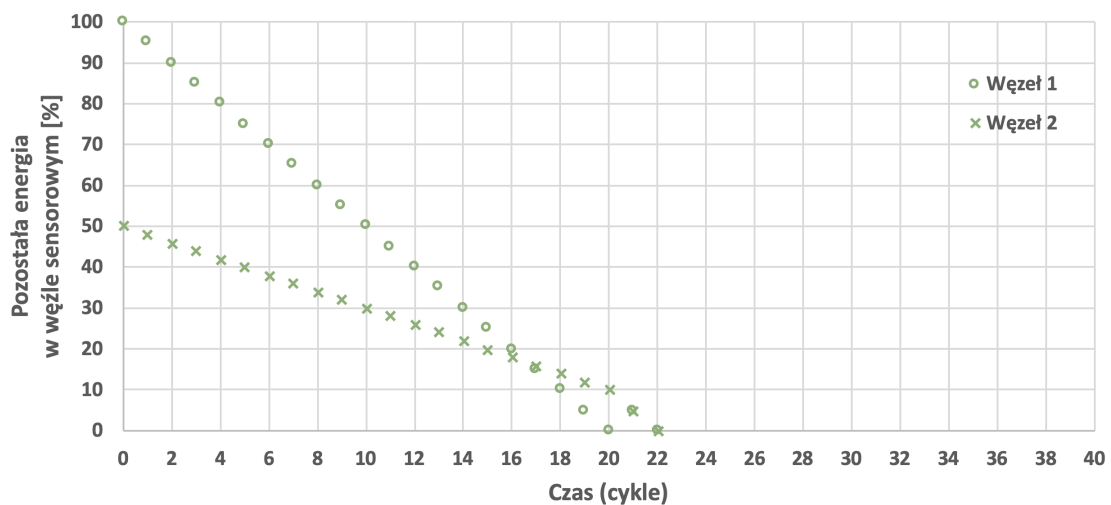


Rys. 4.5: Przykład zużycia energii przez węzły sensorowe: jako pierwszy rolę nadrzędną pełni węzeł 1, poziom energii początkowej jest jednakowy ( $LT_A = 32$ ).



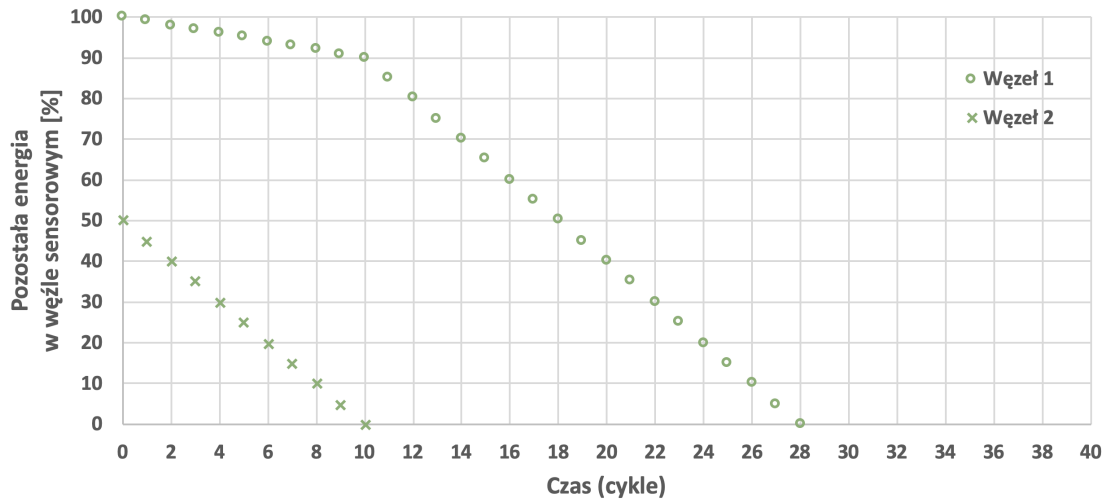
Rys. 4.6: Przykład zużywania energii przez węzły sensorowe: jako pierwszy rolę nadrzędną pełni węzeł 2, poziom energii początkowej jest jednakowy ( $LT_A = 36$ ).

W przykładach z rysunków 4.5 i 4.6 węzły 1 i 2 mają taki sam początkowy poziom energii ( $EI_1 = 100$  oraz  $EI_2 = 100$ ). Ponadto, przyjęto, że  $EH = 5$  i założono, że prawdopodobieństwo transmisji dla węzła 1 jest niższe niż dla węzła 2, w związku z czym  $EM_1 = 1$  oraz  $EM_2 = 2$ . Rys. 4.5 ilustruje sytuację, w której jako węzeł  $i$  został wybrany węzeł 1, czyli węzeł o niższym prawdopodobieństwie transmisji. W tym przypadku czas życia sieci wyniósł 32 cykle. W przykładzie z rys. 4.6 węzłem  $i$  został węzeł 2, dla którego prawdopodobieństwo transmisji jest wyższe, dzięki czemu wydłużono czas życia sieci do 36 cykli.



Rys. 4.7: Przykład zużywania energii przez węzły sensorowe: jako pierwszy rolę nadrzędną pełni węzeł 1, poziom energii początkowej jest różny ( $LT_A = 22$ ).





Rys. 4.8: Przykład zużywania energii przez węzły sensorowe: jako pierwszy rolę nadrzędną pełni węzeł 1, poziom energii początkowej jest różny ( $LT_A = 28$ ).

Przykład uwzględniający węzły o różnych poziomach energii początkowej został przedstawiony na rysunkach 4.7 i 4.8. Założono, że początkowy poziom energii węzła 1 wynosi 100, natomiast dla węzła 2 jest o połowę niższy (równy 50). Pozostałe parametry sieci pozostały bez zmian. Dla przypadku, gdy węzeł 1 pełni rolę nadrzędną jako pierwszy ( $i = 1$ ) uzyskano czas życia sieci wynoszący 22 cykle (rys. 4.7). W sytuacji, gdy jako pierwszy węzłem nadrzędnym jest węzeł o niższym poziomie energii początkowej ( $i = 2$ ) czas życia sieci zostaje wydłużony do 28 cykli.

Na podstawie powyższej analizy zaproponowano algorytm wyboru węzła nadrzędnego, który obejmuje dwa zasadnicze kroki. W kroku pierwszym, jako kandydaci do pełnienia roli nadrzędnej wybierane są węzły o najniższej energii początkowej. W kroku drugim, spośród kandydatów wybierany jest węzeł o najwyższym prawdopodobieństwie transmisji.

Szczegóły implementacji opracowanych algorytmów wyboru węzła nadrzędnego zostały przedstawione za pomocą pseudokodu w rozdziale 5 (algorytm 8 oraz 9).

### 4.3 Złożoność obliczeniowa proponowanych algorytmów

W przypadku algorytmu, którego zadaniem jest wydłużanie czasu do rozładowania jednego węzła, najbardziej złożoną obliczeniowo operacją jest obliczanie czasów  $TCH_i$ . Natomiast w algorytmie mającym na celu wydłużenie czasu życia sieci do momentu rozładowania wszystkich węzłów, najbardziej złożoną operacją jest poszukiwanie minimum zgodnie z wzorem 4.9. Operację tą można zrealizować poprzez dwukrotne uruchomienie algorytmu sortowania. W przypadku wykorzystania algorytmu sortowania przez kopcowanie jego złożoność czasowa wynosi  $\mathcal{O}(n \log n)$  [163].

Problemem pozostaje przypadek wydłużania czasu życia do rozładowania jednego węzła.

Jest to związane z potrzebą rozwiązywania układu równań dla  $n$  niewiadomych, gdzie  $n$  odpowiada liczbie węzłów. Czasy  $TCH_i$  można wyznaczać rozwiązując układ równań na podstawie wzorów Cramera. Metoda ta, ze względu na swoją czasową złożoność obliczeniową ( $\mathcal{O}(n!)$ ) ma zastosowanie w sieciach, w których w klastrze znajduje się relatywnie mała liczba węzłów. Dzięki zastosowaniu odpowiednich metod numerycznych możliwe staje się przyspieszenie realizacji tego zadania. Wzory Cramera pozwalają wyznaczyć rozwiązanie układu równań w sposób dokładny, przy stałej liczbie obliczeń. Znane są jednak metody, które realizują to zadanie mniejszym nakładem obliczeniowym. W przypadku metod iteracyjnych wielokrotna realizacja obliczeń zbliża nas do prawidłowego rozwiązania. Obliczenia są powtarzane aż do uzyskania wymaganej dokładności. Reasumując, w metodzie dokładnej liczba obliczeń jest stała, natomiast w metodzie przybliżonej (iteracyjnej) liczba obliczeń zależy od wymaganej dokładności. Do metod przybliżonych można zaliczyć metodę Jacobiego, Gaussa-Seidla oraz relaksacji. Wszystkie wymienione metody przybliżone mają taką samą złożoność obliczeniową ( $\mathcal{O}(n^2)$ ), jednak różnią się czasem uzyskania zbieżności, tj. liczbą iteracji potrzebnych, aby metoda pozwalała znaleźć rozwiązanie układu równań liniowych z zadaną dokładnością.

W metodzie Jacobiego rozważa się układ równań  $Ax = b$ , gdzie  $A$  jest macierzą o wymiarach  $n \times n$  natomiast  $x$  i  $b$  są  $n$ -wymiarowymi wektorami [164]. Jedna iteracja tej metody wiąże się z obliczeniem wszystkich niewiadomych układu. Macierz  $A$  można rozłożyć na sumę trzech macierzy  $D$ ,  $L$ ,  $U$ , gdzie  $D$  jest macierzą diagonalną zawierającą elementy na przekątnej głównej macierzy,  $L$  to dolna macierz trójkątna zawierająca elementy poniżej przekątnej głównej, a  $U$  to górna macierz trójkątna zawierająca elementy powyżej przekątnej głównej. Układ równań  $Ax = b$  można zatem zapisać jako:

$$(D + L + U)x = b. \quad (4.10)$$

Aby wyznaczyć  $x$  w sposób iteracyjny należy przekształcić przedstawione wcześniej równanie do postaci:

$$Dx = b - (L + U)x. \quad (4.11)$$

W celu uwzględnienia  $x$  wyznaczanych w kolejnych iteracjach, należy wprowadzić przybliżenie  $x^k$  oraz  $x^{(k+1)}$ :

$$Dx^{(k+1)} = b - (L + U)x^k. \quad (4.12)$$

Następnie, mnożąc obie strony równania przez  $D^{-1}$ , otrzymujemy postać:

$$x^{(k+1)} = D^{-1}(b - (L + U)x^k) \quad (4.13)$$

W metodzie Jacobiego, nowe przybliżenie  $x^{(k+1)}$  jest obliczane wyłącznie na podstawie wartości z poprzedniej iteracji  $x^k$ . Każdy element  $x_i$  wektora  $x$  jest aktualizowany zgodnie

z poniższym wzorem:

$$x_i^{(k+1)} = \frac{1}{a_{ii}} \left( b_i - \sum_{i \neq j} a_{ij} x_j^k \right), \quad (4.14)$$

gdzie  $a_{ii}$  to element przekątnej głównej macierzy  $A$ ,  $a_{ij}$  to pozostałe elementy macierzy  $A$ , z kolei  $b_i$  to odpowiedni element wektora  $b$ . Proces wyznaczania kolejnych przybliżeń kończy się po spełnieniu kryterium zbieżności:

$$\|x^{(k+1)} - x^k\| \leq \epsilon, \quad (4.15)$$

gdzie symbolem  $\epsilon$  oznaczono maksymalną dopuszczalną różnicę między kolejnymi przybliżeniami wektora  $x$ . Symbolem  $\|\cdot\|$  oznaczono normę wektora, która jest miarą długości lub wielkości wektora w przestrzeni wektorowej. W kontekście iteracyjnych metod numerycznych norma mierzy odległość pomiędzy kolejnymi iteracjami przybliżenia rozwiązania układu równań. W opisywanym przypadku zastosowano normę euklidesową, zwaną również normą  $L_2$ , która jest najczęściej stosowaną normą w przestrzeni euklidesowej  $\mathbb{R}^n$ . Dla wektora  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$  normę euklidesową definiuje się jako:

$$\|x\|_2 = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2} \quad (4.16)$$

Metoda Jacobiego jest prostym i intuicyjnym podejściem do rozwiązywania układów równań liniowych, ale jej zbieżność nie jest gwarantowana dla wszystkich układów. Konwergencja zależy od własności macierzy  $A$ . W praktycznym zastosowaniu częściej wykorzystuje się bardziej zaawansowane metody, takie jak metoda Gaussa-Seidla czy sukcesywnej relaksacji.

W metodzie Gaussa-Seidla, w przeciwieństwie do metody Jacobiego, przybliżone wartości niewiadomych ( $x$ ) są aktualizowane i używane w kolejnych obliczeniach w ramach tej samej iteracji [165]. Podobnie jak w metodzie Jacobiego, macierz  $A$  dzielimy na trzy części, a następnie, w celu wyrażenia  $x$  w sposób iteracyjny, przekształcamy równanie 4.10 do postaci:

$$(D + L)x = b - Ux. \quad (4.17)$$

Następnie należy wyizolować  $x$  po lewej stronie równania. Z uwagi na fakt, że  $D + L$  jest dolną macierzą trójkątną z elementami na przekątnej głównej, możliwe jest jej odwrócenie, a całe równanie przyjmuje postać:

$$x = (D + L)^{-1}(b - Ux). \quad (4.18)$$

W celu uzyskania iteracyjnej formy wzoru należy wprowadzić indeks iteracji  $k$ :

$$x^{k+1} = (D + L)^{-1}(b - Ux^k). \quad (4.19)$$

Równanie to można zapisać bardziej szczegółowo dla każdej składowej wektora  $x$  ( $i$ -tego

elementu):

$$x_i^{(k+1)} = \frac{1}{a_{ii}} \left( b_i - \sum_{j<i} a_{ij} x_j^{(k+1)} - \sum_{j>i} a_{ij} x_j^k \right), \quad (4.20)$$

gdzie  $a_{ii}$  to element diagonalny macierzy  $A$ ,  $a_{ij}$  to elementy macierzy  $A$  poza diagonalą,  $b_i$  to  $i$ -ta składowa wektora  $b$ ,  $x_j^{(k+1)}$  to  $j$ -ta składowa wektora  $x$  wyznaczona w bieżącej iteracji, natomiast  $x_j^k$  to  $j$ -ta składowa wektora  $x$  pochodząca z poprzedniej iteracji.

Omawiana metoda pozwala na uzyskanie zbieżności szybciej niż metoda Jacobiego, ponieważ każda iteracja uwzględnia najnowsze dostępne wartości ( $x_j^{(k+1)}$ ), jednak jej implementacja nie zmienia złożoności czasowej algorytmu rozwiązywania układu równań.

Metoda SOR (ang. *Successive OverRelaxation*) jest ulepszeniem metody Gaussa-Seidla [166]. Zakłada ona wprowadzenie dodatkowego parametru  $\omega$ . Poprzez optymalny wybór wspomnianego parametru możliwe jest uzyskanie szybszej zbieżności nie tylko względem metody Jacobiego, ale również omówionej wcześniej metody Gaussa-Seidla.

W celu wyprowadzenia wzoru iteracyjnego dla metody SOR należy uwzględnić parametr relaksacji  $\omega$ :

$$(D + L)X^{(k+1)} = \omega b - \omega U x^k + (1 - \omega)(D + L)x^k. \quad (4.21)$$

Po rozwiązaniu równania względem  $x^{(k+1)}$  przyjmuje ono postać:

$$x^{(k+1)} = (D + \omega L)^{-1} [\omega b - (\omega U + (1 - \omega)D)x^k]. \quad (4.22)$$

W praktyce, algorytm SOR zapisuje się w bardziej intuicyjnej formie, podobnej do metody Gaussa-Seidla, ale z dodatkowym uwzględnieniem parametru  $\omega$ :

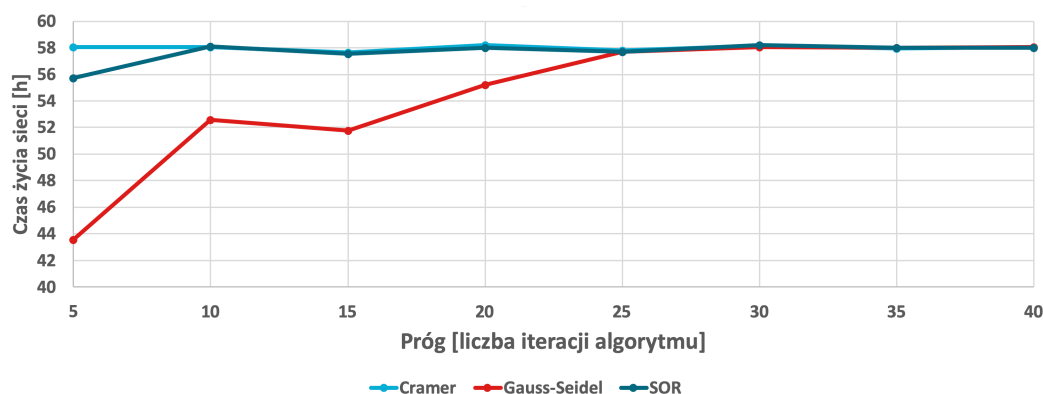
$$x_i^{(k+1)} = (1 - \omega)x_i^k + \frac{\omega}{a_{ii}} \left( b_i - \sum_{j<i} a_{ij} x_j^{(k+1)} - \sum_{j>i} a_{ij} x_j^k \right), \quad (4.23)$$

dla  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Jak można zaobserwować dla  $\omega = 1$  powyższe równanie sprowadza się do postaci znanej z metody Gaussa-Seidla. W przypadku gdy  $\omega \in (0,1)$  w obliczeniach stosuje się podrelaksację, co skutkuje mniejszym udziałem nowo wyznaczonego rozwiązania w danej iteracji. W pozostałych przypadkach, a więc gdy  $\omega \in (1,2)$ , wprowadza się zjawisko nadrelaksacji, gdzie poprzednie rozwiązanie jest usuwane z funkcji. Podczas implementacji tej metody stosuje się różne procedury wyznaczania parametru  $\omega$  [167, 168], aby zapewnić jej efektywność.

Na rys. 4.9 przedstawiono wykres zależności czasu życia sieci sensorowej w funkcji liczby iteracji omówionych wcześniej algorytmów. Czas życia wyznaczono dla sieci opartej na technologii LoRaWAN, ze stałym prawdopodobieństwem transmisji danych przez poszczególne węzły sensorowe. Jak można zaobserwować, w przypadku implementacji metody Gaussa-Seidla możliwe jest osiągnięcie podobnego czasu życia sieci jak przy wykorzystaniu wzorów Cramera.

W tym celu, w każdej rundzie należy wykonać 25 iteracji obliczeń. Przy zastosowaniu podejścia SOR możliwe było zmniejszenie liczby iteracji do 10. We wspomnianej metodzie należało jednak uprzednio wyznaczyć wartość parametru  $\omega$ . We wskazanym scenariuszu zastosowano podejście podrelaksacji, przyjmując parametr  $\omega = 0,8$ . Na wykresie nie uwzględniono metody Jacobiego, ponieważ nie wykazała on zbieżności do wartości pierwiastków, które wyznaczyły wzory Cramera. Warto zauważyć, że metoda SOR, dla której osiągnięto najszybszą zbieżność wymaga wyznaczenia optymalnej wartości  $\omega$ , co może być operacją obliczeniowo bardzo kosztowną. Mając na uwagę zysk płynący z zastosowania przybliżonej metody obliczenia pierwiastków układu równań, lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie metody Gaussa-Seidla.



Rys. 4.9: Wykres zależności czasu życia sieci w funkcji liczby iteracji przy wykorzystaniu wzorów Cramera oraz algorytmów Gaussa-Seidla i SOR

## Rozdział 5

# Model bezprzewodowej sieci sensorowej

W niniejszym rozdziale zaprezentowany został model, który pozwala określić czas życia sieci sensorowej. Przedstawiony model został użyty do przeprowadzenia eksperymentalnej oceny jakościowej rozpatrywanych metod selekcji węzła nadrzędnego. Głównymi elementami modelu są algorytmy transmisji danych realizowane przez poszczególne węzły oraz parametry opisujące energię zużywaną przez węzeł sensorowy w poszczególnych krokach pracy sieci.

### 5.1 Inicjalizacja i praca węzłów sensorowych

Funkcjonowanie rozpatrywanej sieci ma na celu dostarczanie do stacji bazowej użytecznych danych pomiarowych, zarejestrowanych przez czujniki w węzłach sensorowych. W każdym kroku działania sieci, wybrany węzeł sensorowy pełni rolę węzła nadrzędnego, podczas gdy pozostałe realizują zadania przypisane węzłom podrzędnym. Jeżeli w danym kroku węzeł podrzędny podejmie decyzję o konieczności przesłania danych do węzła nadrzędnego, wówczas aktywuje moduł radiowy i wykonuje transmisję. W przeciwnym wypadku transmisja jest pomijana. Węzeł nadrzędny analizuje pomiary pochodzące z własnych czujników oraz dodatkowo otrzymuje i gromadzi informacje od węzłów podrzędnych, po czym przekazuje zebrane dane do stacji bazowej.

Czas pracy sieci sensorowej jest podzielony na rundy, które obejmują jednakową liczbę kroków. Po wykonaniu przez sieć sensorową ostatniego kroku w danej rundzie dokonywany jest wybór węzła, który będzie pełnił rolę węzła nadrzędnego w następnej rundzie. Operacje, które są realizowane przez węzły sieci sensorowej zostały przedstawione w postaci pseudokodu. W początkowym etapie działania sieci następuje inicjalizacja i ustalanie ról węzłów zgodnie z Algorytmem 1. Każdy z węzłów na etapie wstępnej konfiguracji posiada przypisany unikatowy adres logiczny (identyfikator *ident*), dzięki któremu możliwa jest identyfikacja poszczególnych węzłów w sieci. Identyfikator służy również do wyznaczenia czasu synchronizacji. Istnieje tutaj następująca zależność: im wyższy adres logiczny, tym dłużej węzeł będzie oczekiwał na odbiór ramki synchronizacyjnej. Opisany mechanizm zapobiega sytuacji, w której wiele węzłów dołącza do sieci w tym samym czasie. Działanie algorytmu zilustrowano na rys. 5.1, gdzie węzeł 1 przyjmuje rolę nadrzędną a węzły 2 i 3 są węzłami podrzędnymi. Zgodnie z przedstawionym algorytmem, po uruchomieniu sieci następuje oczekiwanie na odbiór ramki synchronizacyjnej. Węzeł, który ma najniższy adres logiczny zacznie przysyłać ramki synchronizacyjne, co oznacza przyjęcie roli węzła nadrzędnego. Pozostałym węzłom z racji zastosowanego opóźnienia, wyni-

kającego z wydłużonego nasłuchiwania ramki synchronizacyjnej lub późniejszego uruchomienia węzła, zostanie przypisana rola węzła podrzędnego. Z uwagi na fakt, że inicjalizacja węzła może się rozpocząć w dowolnym momencie podczas działania sieci, np. w przypadku dołączenia węzła do sieci po awarii, węzeł, który odebrał ramkę synchronizacyjną dowiaduje się jaki czas pozostał do kolejnej synchronizacji oraz do którego węzła sensorowego należy kierować dane. Po procesie inicjalizacji następuje przejście węzła sensorowego w tryb uśpienia, którego czas jest zależny od celu zastosowania sieci sensorowej i wymagań dotyczących częstotliwości, z jaką muszą być dokonywane pomiary. W tabeli 5.1 wyjaśniono znaczenie zmiennych wykorzystywanych w Algorytmie 1, jak również w pozostałych algorytmach opisanych w dalszej części rozdziału.

Tabela 5.1: Znaczenie zmiennych wykorzystywanych w Algorytmach 1–11

Zmienna	Opis
$c$	licznik rund pełnienia roli węzła nadrzędnego
$op$	opóźnienie dołączania do sieci kolejnych węzłów
$ident$	identyfikator węzła sensorowego
$czas\ synchronizacji$	maksymalny czas oczekiwania na odbiór ramki synchronizacyjnej
$czas\ uśpienia$	czas, po upływie którego węzeł aktywuje moduł komunikacyjny
$ostatni\ krok$	ostatnia iteracja pracy węzła, po której następuje zakończenie rundy
$czas\ odbioru$	czas, przez który węzeł oczekuje na przesłanie danych od pozostałych węzłów
$n$	liczba węzłów w klastrze
$id$	identyfikator węzła nadrzędnego
$k$	liczba kroków w rundzie
$EI$	tablica przechowująca początkowy poziom naładowania baterii wszystkich węzłów
$b$	energia dostępna w węźle $id$ w momencie przejścia roli węzła nadrzędnego
$e$	próg energetyczny, po którego osiągnięciu należy przekazać rolę węzła nadrzędnego do kolejnego węzła
$t$	liczba transmisji danych, po której osiągnięciu należy przekazać rolę węzła nadrzędnego do kolejnego węzła

Zmienna	Opis
$r$	aktualnie dostępna energia w węźle $id$
$E$	tablica przechowująca liczby transmisji dokonanych w poprzedniej rundzie przez wszystkie węzły
$W$	tablica wskazująca aktywne węzły w klastrze
$s$	tablica wskazująca dostępną energię w węzłach
$S_{CH}$	energia zużywana przez węzeł, który w danym kroku jego pracy pełni rolę węzła nadrzędnego
$S_{TRANS}$	energia zużywana przez węzeł, który w danym kroku jego pracy pełni rolę węzła podrzędnego i dokonuje transmisji danych
$S_{NOTTRANS}$	energia zużywana przez węzeł, który w danym kroku jego pracy pełni rolę węzła podrzędnego i nie dokonuje transmisji danych

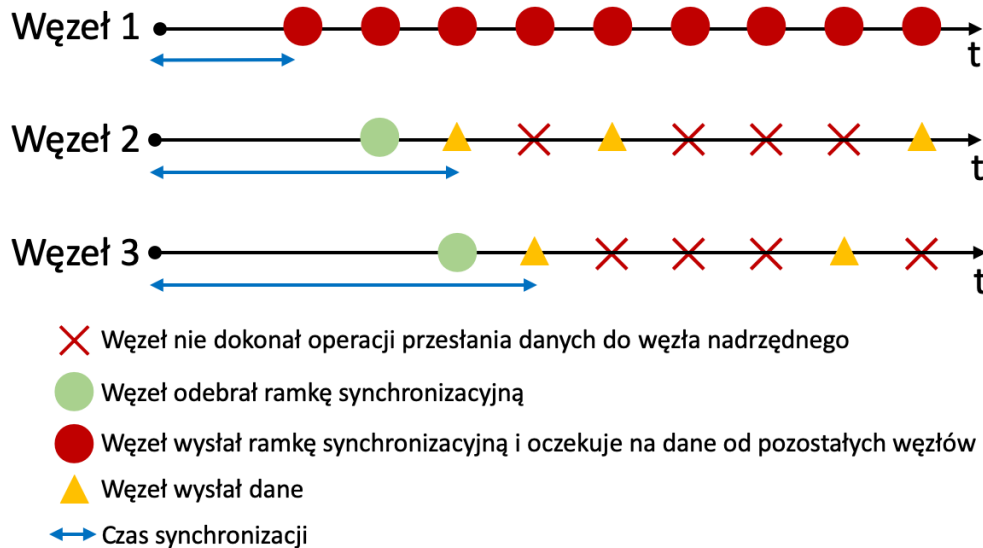
---

**Algorytm 1** Inicjalizacja węzła

włącz moduł komunikacyjny  
czas synchronizacji  $\leftarrow op \cdot ident$   
uruchom nasłuchiwanie ramki synchronizacyjnej (*czas synchronizacji*)  
**if** odebrano ramkę synchronizacyjną **then**  
rola węzła  $\leftarrow$  węzeł podrzędny  
krok  $\leftarrow$  krok wyznaczony na podstawie odebranej ramki synchronizacyjnej  
 $c \leftarrow 0$   
**else**  
rola  $\leftarrow$  węzeł nadrzędny  
krok  $\leftarrow 0$   
**end if**  
wyłącz moduł komunikacyjny (*czas uśpienia*)

---





Rys. 5.1: Proces inicjalizacji sieci sensorowej składającej się z trzech węzłów

Operacje realizowane przez węzeł podrzędny opisuje Algorytm 2. Podczas analizy prezentowanego pseudokodu należy wziąć pod uwagę, że dotyczy on pracy węzła w jednym kroku działania sieci. Podczas pracy węzłów dokonuje się okresowej inkrementacji licznika kroków (*krok*). Kolejną operacją w Algorytmie 2 jest akwizycja danych, które pochodzą z wszystkich dostępnych w węźle czujników, następnie węzeł podejmuje decyzję dotyczącą transmisji danych. Jeżeli węzeł sensorowy zadecyduje, że dane mają zostać wysłane do węzła nadrzędnego, to wykonuje transmisję. Aby oszczędzać energię, węzeł sensorowy aktywuje moduł komunikacyjny tylko wtedy, gdy transmisja danych jest niezbędna. Gdy węzeł wykona predefiniowaną liczbę kroków pracy, następuje przejście do procedury selekcji węzła nadrzędnego. Wspomniany proces rozpoczyna się od aktywacji modułu komunikacyjnego, ponieważ na tym etapie węzeł podrzędny będzie oczekiwał na przesłanie ramki synchronizacyjnej z węzła nadrzędnego. Po realizacji procedury selekcji węzła nadrzędnego, węzeł w pierwszej wysyłanej ramce danych umieszcza informację o początkowym poziomie energii ( $EI_i$ ). Jeżeli w danym kroku pracy sieci węzeł nie przechodzi do procedury selekcji węzła nadrzędnego, następuje wyłączenie modułu komunikacyjnego na taki sam czas jak w omawianym wcześniej Algorytmie 1.

---

**Algorytm 2** Algorytm pracy węzła podrzędnego

---

```
krok ← krok + 1
odczytaj dane z czujników
zdecyduj czy dane powinny zostać przesłane
if dane powinny zostać przesłane then
    włącz moduł komunikacyjny
    wyślij dane do węzła nadrzędnego
end if
if krok = ostatni krok then
    if moduł komunikacyjny jest wyłączony then
        włącz moduł komunikacyjny
    end if
    uruchom procedurę selekcji węzła nadrzędnego
end if
wyłącz moduł komunikacyjny (czas uśpienia)
```

---

Algorytm 3 opisuje działanie węzła, który pełni rolę nadrzędną w klastrze. Procedura rozpoczyna się od inkrementacji licznika rund pełnienia roli węzła nadrzędnego. Kolejną operacją jest włączenie modułu komunikacyjnego oraz przesłanie ramki synchronizującej do wszystkich węzłów w klastrze. Ramka synchronizująca zawiera dane, które są niezbędne aby nowe węzły mogły dołączyć do sieci, tj. aktualny stan licznika kroków i identyfikator węzła nadrzędnego. Dzięki temu istnieje możliwość dołączenia nowego węzła do sieci w dowolnym momencie, podczas trwania rundy. Po przesłaniu ramki synchronizującej, podobnie jak w przypadku węzła podrzędnego, węzeł nadrzędny odczytuje dane ze wszystkich dostępnych czujników, po czym następuje oczekiwanie na dane od pozostałych węzłów należących do klastra. Wartość parametru *czas odbioru* powinna być tak dobrana, aby węzeł nadrzędny był w stanie odebrać dane od wszystkich pozostałych węzłów. Po odebraniu danych, w każdym kroku pracy węzła następuje aktualizacja licznika transmisji kierowanych do węzła nadrzędnego przez poszczególne węzły podrzędne ( $E$ ). Transmisje dla węzła nadrzędnego w liczniku  $E$  są zliczane tak jakby pełnił on rolę podrzędną tzn. węzeł na podstawie odczytu swoich czujników ocenia czy zebrana informacja musiałaby zostać przesłana i jeżeli ten warunek jest spełniony, wówczas inkrementuje się wartość  $E_{id}$ . Kolejną operacją jest agregacja oraz przesłanie danych do stacji bazowej. W przypadku, gdy węzeł zrealizuje predefiniowaną liczbę kroków, następuje koniec rundy i przejście do procedury selekcji węzła nadrzędnego. Po realizacji tej procedury, moduł komunikacyjny należy ustawić w tryb uśpienia (jak w przypadku Algorytmu 1).

---

**Algorytm 3** Algorytm pracy węzła nadrzędnego

---

```
krok += 1
if krok = 1 then
     $c \leftarrow c + 1$ 
end if
włącz moduł komunikacyjny
prześlij ramkę synchronizującą do wszystkich węzłów w klastrze
odczytaj dane z czujników
oczekuj na dane od węzłów podrzędnych (czas odbioru)
zaktualizuj licznik transmisji  $E_i$ 
zagreguj dane
wyślij zagregowane dane do stacji bazowej
if krok = ostatni krok then
    uruchom procedurę selekcji węzła nadrzędnego
end if
wyłącz moduł komunikacyjny (czas uśpienia)
```

---

## 5.2 Selekcja węzła nadrzędnego

Po wykonaniu określonej liczby kroków pracy węzłów sensorowych, czyli po zakończeniu rundy uruchamiana jest procedura selekcji węzła nadrzędnego (Algorytm 4), której przebieg zależy od roli, jaką aktualnie realizuje dany węzeł. Jeżeli węzeł pełni rolę nadrzędną, wówczas jego zadaniem jest wyznaczenie identyfikatora węzła, który będzie pełnił tę rolę w kolejnej rundzie. Decyzja dotycząca ewentualnego przekazania roli nadrzędnej jest zależna od przyjętej metody, którą w Algorytmie 4 określa wartość zmiennej *metoda*. Po wybraniu nowego węzła nadrzędnego następuje przesłanie do wszystkich węzłów w klastrze ramki synchronizującej, zawierającej nowo wyznaczony identyfikator węzła nadrzędnego. Nasłuchiwanie ramki synchronizującej musi być realizowane w tym samym momencie przez wszystkie węzły. W przeciwnym przypadku może dojść do sytuacji, w której tylko część węzłów będzie dysponowała poprawnym identyfikatorem węzła nadrzędnego, co skutkuje nieprawidłowym działaniem węzłów i częstym uruchamianiem algorytmu inicjalizacji oraz ma negatywny wpływ na czas życia sieci sensorowej.

Operacje wykonywane przez węzeł podrzędny podczas selekcji nowego węzła nadrzędnego rozpoczynają się od nasłuchiwania ramki synchronizującej, które kończy się po odebraniu ramki lub upływie określonego czasu (zmienna *czas odbioru*). Jeżeli węzeł nie odbierze ramki synchronizującej, wówczas następuje uruchomienie procedury inicjalizacji, którą prezentuje Algorytm 1. Gdy ramka synchronizująca zostanie odebrana, to następuje sprawdzenie zawartego w niej identyfikatora węzła nadrzędnego. Jeżeli jest on zgodny z identyfikatorem węzła, który wykonuje tę operację, wówczas w rozpoczynającej się rundzie dany węzeł przyjmuje rolę węzła nadrzędnego. W przeciwnym wypadku, dany węzeł przyjmuje rolę podrzędną a identyfikator węzła nadrzędnego jest interpretowany jako adres odbiorcy, do którego należy przesyłać dane w rozpoczynającej się rundzie.

Szczegółowe operacje, które są wykonywane aby dokonać wyboru węzła nadrzędnego, zostały przedstawione za pomocą Algorytmów 5 – 10. Poszczególne algorytmy odpowiadają metodom opisanym w rozdziałach 3 i 4.

Algorytm 5 przedstawia podstawowe podejście, zgodnie z którym rola węzłów nie ulega zmianie. W tym przypadku wysyłana cyklicznie ramka synchronizująca zawiera identyfikator węzła nadrzędnego ustalony na etapie inicjalizacji węzłów, który pozostaje bez zmian przez cały czas życia sieci.

---

**Algorytm 4** Procedura selekcji węzła nadrzędnego
 

---

```

if rola węzła = węzeł nadrzędny then
  Switch(metoda)
    Case CONST:                                ▷ Rola węzła nie ulega zmianie, Algorytm 5
      węzeł nadrzędny = wyznaczWezełNadrzedny( $W, id$ )
      Break
    Case LEACH:                                ▷ Algorytm 6
      węzeł nadrzędny = wyznaczWezełNadrzedny( $W, n, id$ )
      Break
    Case EDCR:                                  ▷ Algorytm 7
      węzeł nadrzędny = wyznaczWezełNadrzedny( $W, n, id, r, b, e$ )
      Break
    Case PDCR dla wydłużenia czasu  $LT_O$ :        ▷ Algorytm 8
      węzeł nadrzędny = wyznaczWezełNadrzedny( $W, n, id, E, k, c, EI$ )
      Break
    Case PDCR dla wydłużenia czasu  $LT_A$ :        ▷ Algorytm 9
      węzeł nadrzędny = wyznaczWezełNadrzedny( $W, n, E, k, EI$ )
      Break
    Case FDCR:                                  ▷ Algorytm 10
      węzeł nadrzędny = wyznaczWezełNadrzedny( $W, n, id, E, t$ )
      Break
  End Switch
  prześlij ramkę synchronizującą do wszystkich węzłów w klastrze
  wyłącz moduł komunikacyjny (czas uśpienia)
else if rola węzła = węzeł podrzędny then
  uruchom nasłuchiwanie ramki synchronizacyjnej
  repeat
    czekaj
  until odebrano ramkę synchronizacyjną lub minął czas odbioru
  if odebrano ramkę synchronizacyjną then
    if adres węzła nadrzędnego = własny adres then
      rola węzła = węzeł nadrzędny
    else
      rola węzła = węzeł podrzędny
       $c \leftarrow 0$ 
    end if
    wyłącz moduł komunikacyjny (czas uśpienia)
  else
    uruchom procedurę inicjalizacji
  end if
end if
krok = 0

```

---

---

**Algorytm 5** Procedura selekcji węzła nadrzędnego, gdy rola węzła nie zmienia się w czasie

---

**Wyjście:** Wybrany węzeł sieci, który w następnej rundzie będzie pełnił rolę węzła nadrzędnego.

```

function WYZNACZWEZELNADRZEDNY( $W$ ,  $id$ )
  return  $id$ 
end function

```

---

Algorytm 6 przedstawia działanie metody LEACH, zgodnie z którą rola nadrzędna przekazywana jest do kolejnego węzła (wg. kolejności identyfikatorów) w każdej rundzie. W ten sposób każdy węzeł w sieci ma szansę zostać węzłem nadrzędnym, co ma na celu osiągnięcie równomiernego zużycia energii węzłów. Na potrzeby algorytmu zdefiniowano tablicę  $W$  wskazującą aktywne węzły w klastrze. W przypadku, gdy element tablicy ( $W_i$ ) przyjmuje wartość 0 oznacza to, że węzeł o identyfikatorze odpowiadającym wartości indeksu tablicy ( $i$ ) wyczerpał swoje zasoby energii i jest nieaktywny. Wspomniana tablica jest wykorzystywana, aby uniknąć prób przekazania roli nadrzędnej do węzła, który nie jest już aktywny

---

**Algorytm 6** Procedura selekcji węzła nadrzędnego dla metody LEACH

---

**Wyjście:** Wybrany węzeł sieci, który w następnej rundzie będzie pełnił rolę węzła nadrzędnego.

```

function WYZNACZWEZELNADRZEDNY( $W$ ,  $n$ ,  $id$ )
  następnyWęzełNadrzędny  $\leftarrow$  -1
  for  $i \leftarrow (id + 1)$  to  $n - 1$  do
    if  $W_i = 1$  then
      następnyWęzełNadrzędny  $\leftarrow$   $i$ 
      break
    end if
  end for
  if następnyWęzełNadrzędny = -1 then
    for  $i \leftarrow 0$  to  $id$  do
      if  $W_i = 1$  then
        następnyWęzełNadrzędny  $\leftarrow$   $i$ 
        break
      end if
    end for
  end if
  return następnyWęzełNadrzędny
end function

```

---

Algorytm 7 przedstawia działanie metody EDCR, bazującej na zapamiętywaniu poziomu energii, która jest dostępna w węźle w momencie przejęcia przez niego roli węzła nadrzędnego (b). Wspomniany parametr jest wartością bazową, względem której wyznacza się następnie procent energii zużytej przez węzeł. Omawiane podejście wymaga przeprowadzenia procesu kalibracji, którego celem jest wyznaczenie progu energetycznego ( $e$ ), po którego przekroczeniu następuje przekazanie roli nadrzędnej do kolejnego węzła.

**Algorytm 7** Procedura selekcji węzła nadrzędnego dla metody EDCR**Wyjście:** Wybrany węzeł sieci, który w następnej rundzie będzie pełnił rolę węzła nadrzędnego.**function** WYZNACZWEZELNADRZEDNY( $W, n, id, r, b, e$ )

```

if  $r/b \leq e$  then
  następnyWęzełNadrzędny  $\leftarrow -1$ 
  for  $i \leftarrow (id + 1)$  to  $n - 1$  do
    if  $W_i = 1$  then
      następnyWęzełNadrzędny  $\leftarrow i$ 
      break
    end if
  end for
  if następnyWęzełNadrzędny = -1 then
    for  $i \leftarrow 0$  to  $id$  do
      if  $W_i = 1$  then
        następnyWęzełNadrzędny  $\leftarrow i$ 
        break
      end if
    end for
  end if
else
  następnyWęzełNadrzędny  $\leftarrow id$ 
end if
return następnyWęzełNadrzędny
end function

```

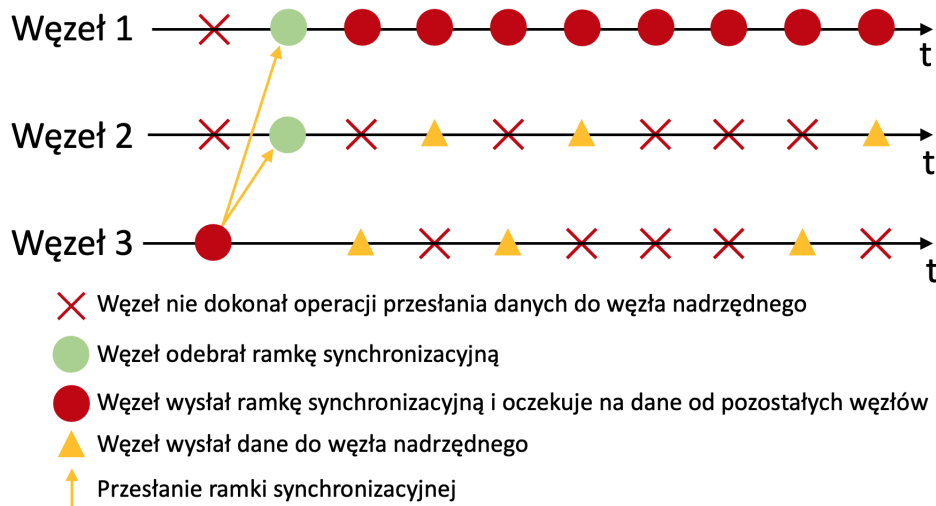
Założmy, że węzeł w momencie przejęcia roli węzła nadrzędnego miał do wykorzystania 750 mWh energii (parametr  $b$ ). Zgodnie z Algorytmem 7 rola węzła nadrzędnego zostanie przekazana do kolejnego węzła, jeżeli zdefiniowany na etapie kalibracji procent dostępnej w węźle energii  $e$  zostanie wykorzystany. W sytuacji, gdy próg energetyczny  $e$  przyjmie wartość 60%, wówczas rola nadrzędna zostaje przekazana do następnego aktywnego węzła, jeżeli na koniec rundy w aktualnym węźle nadrzędnym pozostanie do wykorzystania  $750 \cdot 0,6 = 450$  mWh lub mniej.

Sposób realizacji wyboru węzła nadrzędnego zgodnie z metodami proponowanymi w niniejszej pracy został zaprezentowany w Algorytmach 8 i 9. Proponowane algorytmy oznaczono akronimem PDCR (*Probability-Driven Cluster-head Rotation*), ponieważ uwzględniają prawdopodobieństwo transmisji danych z węzłów podrzędnych.

Algorytm 8 dotyczy przypadku, gdy celem jest wydłużanie czasu życia sieci do rozładowania jednego węzła ( $LT_O$ ). Zgodnie z tym algorytmem prawdopodobieństwo transmisji  $p_i$  jest wyznaczone przez węzeł nadrzędny na podstawie stanu licznika transmisji danych ( $E$ ), który został ustalony w poprzedniej rundzie. W kolejnym kroku węzeł, który dotychczas pełnił rolę węzła nadrzędnego wyznacza wartości parametru  $TCH_i$  (zgodnie z metodą przedstawioną w rozdziale 4.1). Następnie wyznaczona wartość  $TCH_i$  jest porównywana z wartością licznika rund pełnienia roli nadrzędnej  $c$ . W sytuacji, gdy dla rozpatrywanego węzła ( $i = id$ ) wartość

zmiennej  $c$  jest większa od  $TCH_i$ , wówczas następuje przekazanie roli węzła nadrzędnego do kolejnego aktywnego węzła w sieci. W przeciwnym przypadku wspomniany węzeł ogłasza decyzję dotyczącą podtrzymania roli węzła nadrzędnego, synchronizując tym samym pozostałe węzły w sieci.

Rysunek 5.2 przedstawia przykład sieci składającej się z trzech węzłów, w której parametr  $c$  dla węzła 3 (dotychczasowego węzła nadrzędnego) jest większy od  $TCH_3$ . W takim przypadku węzeł 3 przekazuje rolę nadrzędną węzłowi 1. Od tej pory rozpoczyna się nowa runda, podczas której węzeł 1 będzie wysyłał ramki synchronizujące oraz oczekiwał na dane przesyłane z pozostałych węzłów. Warto zauważyć, że transmisja danych przez węzły podrzędne odbywa się w wybranych krokach pracy sieci, o czym węzły decydują indywidualnie. Aby zwiększyć czytelność rysunku 5.2, na diagramie nie zostały zaznaczone operacje przesyłania danych do stacji bazowej. Należy jednak pamiętać, że w przypadku węzła nadrzędnego, transmisja danych do stacji bazowej jest dokonywana w każdym kroku.



Rys. 5.2: Proces zmiany roli węzła nadrzędnego sieci sensorowej składającej się z trzech węzłów

---

**Algorytm 8** Proponowana procedura PDCR dla wydłużenia czasu  $LT_O$ 


---

**Wyjście:** Wybrany węzeł sieci, który w następnej rundzie będzie pełnił rolę węzła nadrzędnego

**function** WYZNACZWEZELNADRZEDNY( $W, n, id, E, k, c, EI$ )

 Zainicjalizuj tablicę  $p$   $\triangleright$  prawdopodobieństwo transmisji danych dla wszystkich węzłów w klastrze

 Zainicjalizuj tablicę  $TCH$   $\triangleright$  Liczba rund przez które  $i$ -ty węzeł sensorowy może pełnić rolę węzła nadrzędnego

**for**  $i \leftarrow 0$  to  $n - 1$  **do**
 $p_i \leftarrow E_i / k$ 
 $\triangleright$  Sieć LoRaWAN  $k = 60$ , sieć ZigBee  $k = 120$ 

 wyznacz  $TCH_i$  w oparciu o wartości przechowywane w tablicy  $EI$ 
**end for**
**if**  $c > TCH_{id}$  **then**

 następnyWęzełNadrzędny  $\leftarrow -1$ 
**for**  $i \leftarrow (id + 1)$  to  $n - 1$  **do**
**if**  $W_i = 1$  **then**

 następnyWęzełNadrzędny  $\leftarrow i$ 
**break**
**end if**
**end for**
**if** następnyWęzełNadrzędny = -1 **then**
**for**  $i \leftarrow 0$  to  $id$  **do**
**if**  $W_i = 1$  **then**

 następnyWęzełNadrzędny  $\leftarrow i$ 
**break**
**end if**
**end for**
**end if**
**return** następnyWęzełNadrzędny

**else**
**return** następnyWęzełNadrzędny

**end if**
**end function**


---

Algorytm 9 realizuje procedurę selekcji węzła nadrzędnego zgodnie z proponowaną metodą, której celem jest wydłużanie czasu życia sieci sensorowej, definiowanego jako czas do rozładowania wszystkich węzłów ( $LT_A$ ). Początkowy etap działania algorytmu jest taki sam jak w przypadku Algorytmu 8 i polega na wyznaczeniu prawdopodobieństw transmisji  $p_i$ , następnie spośród aktywnych węzłów wybiera się węzeł, który w aktualnej rundzie wykonał najwięcej transmisji i w momencie uruchomienia sieci posiadał najniższy poziom energii ( $EI_i$ ). W opisywanym przypadku mamy do czynienia z dwoma kryteriami wyboru węzła nadrzędnego. Proponowany algorytm rozpoczyna proces wyboru węzła nadrzędnego od znalezienia węzła, który w momencie uruchomienia sieci posiadał najniższy poziom energii (jest on określany jako węzeł referencyjny). W następnym kroku tworzona jest lista węzłów, dla których energia początkowa  $EI_i$  nie jest wyższa od energii początkowej węzła referencyjnego o więcej niż 5%. W ten sposób powstaje lista węzłów kandydujących. Spośród nich ostatecznie wybiera się węzeł, który wyko-



nał najwięcej transmisji. Dzięki uwzględnieniu wielu węzłów kandydujących unika się sytuacji, w której przy niewielkich różnicach energii początkowej, kryterium związane z liczbą transmisji (prawdopodobieństwem  $p_i$ ) nie byłoby uwzględniane w procesie selekcji węzła nadrzędnego. Przykład działania algorytmu został przedstawiony na rys. 5.3.

---

**Algorytm 9** Proponowana procedura PDCR dla wydłużenia czasu  $LT_A$

---

**Wyjście:** Wybrany węzeł sieci, który w następnej rundzie będzie pełnił rolę węzła nadrzędnego

**function** WYZNACZWEZELNADRZEDNY( $W, n, E, k, EI$ )

Zainicjalizuj tablicę  $p$  ▷ tablica przechowująca prawdopodobieństwo transmisji danych dla wszystkich węzłów w klastrze

**for**  $i \leftarrow 0$  to  $n - 1$  **do**

$p_i \leftarrow E_i / k$

▷ Sieć LoRaWAN  $k = 60$ , sieć ZigBee  $k = 120$

**end for**

$X \leftarrow$  identyfikatory węzłów  $i$ , dla których  $W_i = 1$

$X \leftarrow$  identyfikatory węzłów  $i \in X$ , dla których  $EI_i \leq 1,05 \cdot \min_{i \in X} EI_i$

następnyWęzełNadrzędny  $\leftarrow$  identyfikator  $i \in X$ , dla którego  $p_i = \max_{i \in X} p_i$

**return** następnyWęzełNadrzędny

**end function**

---

$i$	$E_i$ [mWh]	$p_i$ [%]	Wybór węzłów kandydujących do przejęcia roli węzła nadrzędnego	$i$	$E_i$ [mWh]	$p_i$ [%]	Wyznaczenie węzła, który dokonał najwięcej transmisji	$i$	$E_i$ [mWh]	$p_i$ [%]
1	3750	15		4	1525	75		6	1500	80
2	2750	15		6	1500	80		6	1500	80
3	3650	20		8	1550	40				
4	1525	75								
5	2625	60								
6	1500	80								
7	3500	10								
8	1550	40								

Rys. 5.3: Przykład wyboru węzła nadrzędnego zgodnie z algorytmem PDCR dla wydłużenia czasu  $LT_A$

Wariantem zaproponowanej metody przekazywania roli węzła nadrzędnego jest algorytm FDCR (*Frame-Driven Cluster-head Rotation*), który uwzględnia liczbę transmisji, tj. ramek odebranych przez węzeł nadrzędny. Nazwa tego algorytmu odnosi się do ramki transmisyjnej, jako jednostki danych PDU (Protocol Data Unit) w kontekście drugiej warstwy modelu referencyjnego OSI. Metoda FDCR (Algorytm 10) bierze pod uwagę łączną liczbę wykonanych transmisji bez szacowania wpływu tych transmisji na poziom energii dostępnej w węzłach. W opisywanej metodzie nie wyznacza się zatem parametru  $p_i$  oraz  $TCH_i$ , co przekłada się na prostotę implementacji rozwiązania w węzłach sensorowych. Warto zauważyć, że w przypadku klastra, w którym pracuje wiele węzłów, wyznaczenie wspomnianych parametrów może być operacją złożoną obliczeniowo. Może to prowadzić do problemów podczas wdrożenia algorytmów na sprzęcie o niskich zasobach obliczeniowych oraz potencjalnie zwiększyć koszt budowy sieci. Zgodnie z algorytmem FDCR, rola węzła nadrzędnego jest przekazywana do następnego węzła sensorowego, jeżeli liczba odebranych przez węzeł nadrzędny transmisji danych osiągnie

predefiniowany próg. Podobnie jak w podejściu EDCR, tak i w tym przypadku konieczne jest przeprowadzenie kalibracji algorytmu, tj. wyznaczenie odpowiedniego progu.

---

**Algorytm 10** Procedura selekcji węzła nadrzędnego dla metody FDCR

---

**Wyjście:** Wybrany węzeł sieci, który w następnej rundzie będzie pełnił rolę węzła nadrzędnego

```

function WYZNACZWEZELNADRZEDNY( $W, n, id, E, t$ )
  wszystkieTransmisje  $\leftarrow 0$ 
  for  $i \leftarrow 0$  to  $n$  do
    wszystkieTransmisje  $\leftarrow$  wszystkieTransmisje +  $E_i$ 
  end for
  nastepnyWęzełNadrzędny  $\leftarrow id$ 
  if wszystkieTransmisje >  $t$  then
    nastepnyWęzełNadrzędny  $\leftarrow -1$ 
    for  $i \leftarrow (id+1)$  to  $n - 1$  do
      if  $W_i = 1$  then
        nastepnyWęzełNadrzędny  $\leftarrow i$ 
        break
      end if
    end for
  if nastepnyWęzełNadrzędny =  $-1$  then
    for  $i \leftarrow 0$  to  $id$  do
      if  $W_i = 1$  then
        nastepnyWęzełNadrzędny  $\leftarrow i$ 
        break
      end if
    end for
  end if
  return nastepnyWęzełNadrzędny
end if
return nastepnyWęzełNadrzędny
end function

```

---

## 5.3 Wyznaczanie czasu życia sieci sensorowej

W celu oceny przedstawionych powyżej algorytmów przeprowadzono ich implementację i testy w prototypowej sieci sensorowej (przygotowano model fizyczny). Dzięki temu potwierdzono możliwość praktycznej implementacji proponowanego podejścia oraz wyznaczono czas życia sieci sensorowej w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Każdy węzeł prototypowej sieci sensorowej zawierał mikrokontroler, radiowy moduł komunikacyjny oraz analogowy czujnik oświetlenia ALS-PT19. Z uwagi na fakt, że przeprowadzenie pełnego zakresu eksperymentów dla różnych badanych algorytmów oraz przyjętych definicji czasu życia na fizycznym sprzęcie byłoby zbyt czasochłonne, zdecydowano się na opracowanie modelu obliczeniowego. W celu kalibracji modelu obliczeniowego wykonano pomiary zużycia energii dla różnych przypadków pracy węzła sensorowego w sieci prototypowej. Pomiary dotyczyły zużycia energii przez węzeł sensorowy

w sytuacjach, w których węzeł: pełni rolę nadrzędną ( $S_{CH}$ ), pełni rolę podrzędną i transmituje dane do węzła nadrzędnego ( $S_{TRANS}$ ) oraz pełni rolę podrzędną i nie transmituje danych do węzła nadrzędnego ( $S_{NOTRANS}$ ). Pomiar zużywanej energii dla powyższych przypadków został przeprowadzony za pomocą układu LTC4150, który stanowił zewnętrzny moduł mikrokontrolera. Proces pomiarowy opiera się na pomiarze różnicowym za pomocą bocznika (ang. *shunt resistor*), tj. rezystora o bardzo małej rezystancji i włączonego w szereg z węzłem sensorowym. Licznik kulombów wykrywa różnicę potencjałów (spadek napięcia) na rezystorze i określa prąd przepływający przez obwód zgodnie z prawem Ohma. Moduł LTC4150 generuje impuls na odpowiednim wyjściu za każdym razem, gdy węzeł sensorowy zużywa 0,1707 mAh. Na podstawie zarejestrowanej liczby impulsów wygenerowanych przez moduł LTC4150 oraz znanego czasu pomiaru możliwe było wyznaczenie zużycia energii przypadającej na jeden krok pracy węzła. Mając na uwadze dokładność prowadzonych badań, pomiar zużycia energii przeprowadzono w okresie sześciu godzin dla każdego z przypadków działania węzła. W danej rundzie w zależności od przyjętej technologii przesyłania danych przyjęto różną liczbę kroków w rundzie, która wynika z ograniczeń technologicznych wykorzystywanych w badaniach modułów radiowych. Z uwagi na fakt, że jedna runda trwa minutę i w tych odstępach możliwa jest zmiana roli poszczególnych węzłów, czas życia sieci określono na podstawie liczby rund liczonych od uruchomienia sieci aż do spełnienia warunku wynikającego z przyjętej definicji czasu życia. W przypadku gdy po przeprowadzeniu eksperymentu sieć pracowała przez 3330 rund, wypadkowy czas życia to 55 minut oraz 30 sekund. Warty odnotowania jest fakt, że zastosowanie modelu obliczeniowego pozwoliło na przyspieszenie eksperymentów służących ewaluacji analizowanych metod. Procedurę wyznaczenia czasu życia sieci sensorowej przedstawia Algorytm 11.

Procedura rozpoczyna się od realizacji inicjalizacji węzłów sensorowych, której celem jest m. in. ustalenie roli wszystkich węzłów (Algorytm 1). Kolejną operacją jest realizacja jednej rundy pracy sieci sensorowej, która jest tożsama z wykonaniem  $k$  kroków pracy  $i$ -tego węzła. W danym kroku działania sieci, wybrany węzeł sensorowy pełni funkcję węzła nadrzędnego realizując operacje przewidziane w Algorytmie 3 oraz zużywa energię, którą określa zmienna  $S_{CH}$ . W przypadku pozostałych węzłów, przypisuje się im rolę podrzędną i wykonują one zadania przewidziane w Algorytmie 3. Zużycie energii dla omawianego węzła jest analizowane dla dwóch przypadków. Jeśli w określonym kroku pracy sieci, węzeł podrzędny przekazuje dane do węzła nadrzędnego, wówczas aktywuje on moduł komunikacyjny i dokonuje transmisji, co wiąże się ze zużyciem porcji energii określonej przez zmienną  $S_{TRANS}$ . W przeciwnym wypadku transmisja nie jest realizowana, a węzeł zużywa energię wyznaczoną przez zmienną  $S_{NOTRANS}$ . W kolejnym rozdziale podano wartości parametrów zużycia energii przypadające na krok pracy węzła, które przedstawiono w tabeli 6.1. Po zakończeniu rundy, której liczba kroków  $k$  jest zależna od przyjętej w badaniach technologii transmisji radiowej, uruchamiana jest procedura selekcji węzła nadrzędnego (Algorytm 4), a po jej zakończeniu wartość zmiennej *licznik rund* jest zwiększana o jeden. W kolejnym kroku określa się liczbę aktywnych węzłów oraz sprawdza się warunek wynikający z przyjętej w realizowanym eksperymencie definicji czasu życia sieci

sensorowej. W przypadku spełnienia wspomnianego warunku, następuje zakończenie Algorytmu 11 i zwracana jest liczba rund, w których sieć realizowała swoje zadanie.

---

**Algorytm 11** Procedura wyznaczenia czasu życia sieci sensorowej
 

---

**Wyjście:** Czas życia sieci sensorowej (liczba rund)

```

function WYZNACZCZASZYCIASIECI( $W, s, n, k, S_{CH}, S_{TRANS}, S_{NOTRANS}$ )
  wykonaj inicjalizację węzłów ▷ Algorytm 1
  while (true) do
    for  $j \leftarrow 0$  to  $k - 1$  do ▷ Sieć LoRaWAN  $k = 60$ , sieć ZigBee  $k = 120$ 
      for  $i \leftarrow 0$  to  $n - 1$  do
        if rola  $i$ -tego węzła = węzeł nadrzędny then
          wykonaj krok pracy węzła podrzędnego ▷ Algorytm 3
           $s_i \leftarrow s_i - S_{CH}$ 
        end if
        if rola  $i$ -tego węzła = węzeł nadrzędny then
          wykonaj krok pracy węzła nadrzędnego ▷ Algorytm 2
          if  $i$ -ty węzeł w aktualnym kroku przesłał dane then
             $s_i \leftarrow s_i - S_{TRANS}$ 
          else if  $i$ -ty węzeł w aktualnym kroku nie przesłał danych then
             $s_i \leftarrow s_i - S_{NOTRANS}$ 
          end if
        end if
      end for
      uruchom procedurę selekcji węzła nadrzędnego ▷ Algorytm 4
    end for
    licznik rund  $\leftarrow$  licznik rund + 1
    aktywneWęzły  $\leftarrow$  0
    for  $i \leftarrow 0$  to  $n - 1$  do
      if  $s_i > 0$  then
        aktywneWęzły  $\leftarrow$  aktywneWęzły + 1
      end if
    end for
    if definicja czasu życia sieci = rozładowanie jednego węzła then
      if aktywneWęzły  $< n$  then
        break
      end if
    end if
    if definicja czasu życia sieci = rozładowanie wszystkich węzłów then
      if aktywneWęzły = 0 then
        break
      end if
    end if
  end while
  return licznik rund
end function

```

---

## Rozdział 6

# Eksperymenty i dyskusja wyników

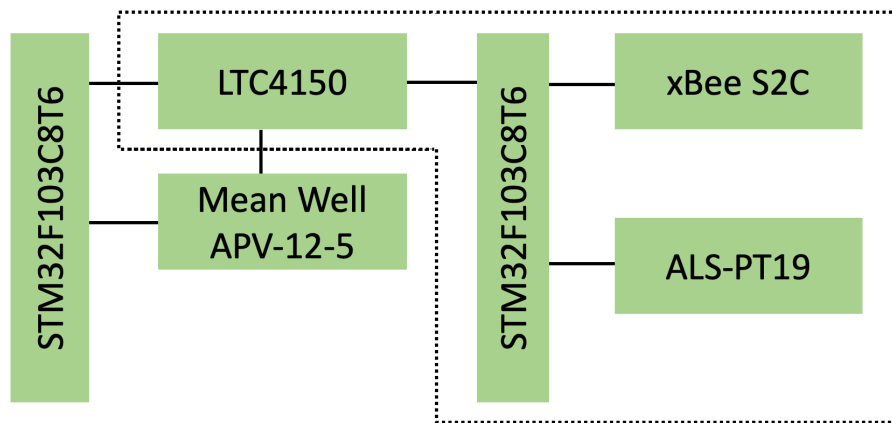
Głównym celem przeprowadzonych eksperymentów było porównanie proponowanego podejścia PDCR, mającego na celu wydłużenie czasu życia sieci, z metodami dostępnymi w literaturze (LEACH, EDCR). Ze względu na zbyt długi czas potrzebny do przeprowadzenia pełnych eksperymentów dla dużej liczby zróżnicowanych scenariuszy na fizycznym sprzęcie, zdecydowano się na stworzenie modelu obliczeniowego. W celu poprawnej kalibracji modelu, należało dokonać pomiaru zużycia energii przez węzeł sensorowy dla różnych technologii transmisji radiowej. Przeprowadzone pomiary bazowały na opracowanych fizycznych modelach sieci sensorowej. Do wyznaczenia czasu życia sieci posłużył model obliczeniowy, zbudowany na bazie implementacji Algorytmu 11. Walidacja modelu obliczeniowego podlegała na porównaniu szacowanego zużycia energii przez węzły pracujące w sieci z wynikami uzyskanymi dla wybranych scenariuszy za pomocą modeli fizycznych. Podczas zasadniczych eksperymentów przyjęto dwie różne definicje czasu życia sieci: czas do rozładowania baterii jednego węzła oraz wszystkich węzłów. Wyznaczenie czasu życia przeprowadzono dla wielu scenariuszy pracy sieci, które uwzględniały różne prawdopodobieństwa transmisji danych, początkowe poziomy naładowania baterii danego węzła oraz technologie bezprzewodowej transmisji danych (ZigBee oraz LoRaWAN).

### 6.1 Parametry zużycia energii dla sieci ZigBee

Podczas projektowania sieci sensorowej rozważano zastosowanie jednego z dwóch typów mikrokontrolerów: ARM i AVR. Obie grupy mikrokontrolerów umożliwiają dezaktywację nieużywanych bloków funkcjonalnych, jednak różnią się w podejściu do oszczędzania energii. Mikrokontrolery z rodziny AVR (np. ATTiny, ATmega) domyślnie mają aktywowane wszystkie moduły, takie jak ADC (ang. *Analog to Digital Converter*), I<sup>2</sup>C (ang. *Inter-Integrated Circuit*) czy SPI (ang. *Serial Peripheral Interface*). W przypadku systemów opartych na rdzeniu ARM przyjęta jest inna strategia, początkowo wszystkie bloki mikrokontrolera nie są aktywne. Możliwe również staje się wyłączenie zasilania poszczególnych portów wejścia/wyjścia, co w przypadku wcześniej wymienionej rodziny mikrokontrolerów AVR nie jest możliwe. Z tego powodu w badaniach wykorzystano mikrokontroler ARM (STM32F103C8T6), który jest taktowany zegarem o częstotliwości 72 MHz i oferuje większą dokładność odmierzenia czasu, pozwalając na uzyskanie lepszej synchronizacji węzłów sensorowych, przy jednoczesnym zachowaniu kompaktowych wymiarów urządzenia.

Moduł komunikacji bezprzewodowej dla tworzonego modelu węzła sensorowego oparto na

technologii ZigBee (xBee S2C). Układ zapewnia bezprzewodową łączność z wieloma urządzeniami dzięki wykorzystaniu oprogramowania DigiMesh opracowanego przez firmę Digi International Inc. DigiMesh upraszcza konfigurację sieci i zwiększa jej niezawodność w warunkach, w których pracujące urządzenia sieciowe mogą ulec awarii. Moduły xBee obsługują wiele topologii sieci, takich jak punkt-punkt, punkt-wielopunkt, siatka oraz drzewo klastrowe. System zawiera zaimplementowany mechanizm retransmisji danych. Na rys. 6.1 przedstawiono schemat blokowy części stanowiska testowego, na którym linią przerywaną zaznaczono moduły będące na wyposażeniu pojedynczego węzła sensorowego. Na omawianym schemacie można dodatkowo wyróżnić mikrokontroler, który jest odizolowany od węzła sensorowego. Jego zadaniem jest rejestracja liczby impulsów wygenerowanych przez układ LTC4150, który jest na wyposażeniu węzła sensorowego.



Rys. 6.1: Część eksperymentalnego stanowiska testowego z dla sieci ZigBee

W celu określenia czasu życia sieci za pomocą modelu obliczeniowego, należy ustalić energię, którą zużywa węzeł w danym kroku jego pracy. W tym celu opracowano fizyczny model sieci w której na stałe do jednego z węzłów przypisano rolę węzła nadrzędnego, pozostałe zaś realizowały zadania przewidziane dla węzła podrzędnego. Następnie, na poszczególnych węzłach sieci zaimplementowano Algorytm 11 oraz wyznaczono wartości parametrów:  $S_{CH}$ ,  $S_{TRANS}$  oraz  $S_{NOTTRANS}$  przypadające na jeden krok pracy węzła. Zużycie energii było monitorowane przez 43200 kroków działania każdego z węzłów. Podczas przeprowadzenia wstępnych badań zweryfikowano możliwość oceny zużycia energii przez węzły sensorowe przy zasilaniu bateryjnym. Po wielokrotnym dokonaniu pomiaru z tymi samymi ustawieniami uzyskano różne wyniki. Przyczyną był problem z uzyskaniem powtarzalności procesu ładowania baterii. W związku z powyższym, podczas realizacji wszystkich pomiarów zdecydowano się na użycie stabilizowanego zasilacza Mean Well APV-12-5 o napięciu wyjściowym 5V. Na podstawie przeprowadzonych badań odnotowano, że węzeł nadrzędny zużył energię równą 1560 mWh. W sytuacji, gdy węzeł pełnił rolę węzła podrzędnego i w każdym kroku przysyłał dane do węzła nadrzędnego układ pomiarowy zarejestrował zużycie energii na poziomie 1245 mWh. W przypadku, gdy węzeł podrzędny nie dokonywał operacji transmisji danych zużył on energię wynoszącą 990 mWh.

Dzieląc przedstawione wyniki przez liczbę zarejestrowanych kroków możliwe jest wyznaczenie zużycia energii przez węzeł sensorowy w jednym kroku oraz różnych scenariuszach jego pracy, które przedstawiono w tabeli 6.1.

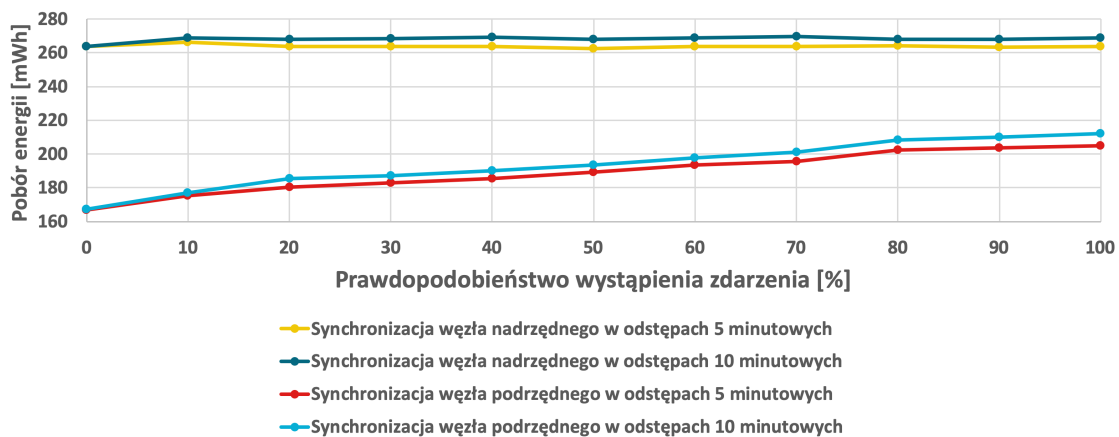
Podczas implementowania operacji przewidzianych w algorytmach przedstawionych w rozdziale 5 przyjęto, że jeden krok pracy odpowiada 0,5 s. Oznacza to, że w przypadku węzła nadrzędnego zadania takie jak akwizycja i analiza danych pochodzących z czujnika oraz ich przesłanie do stacji bazowej były realizowane dwa razy na sekundę. Opracowana sieć została zaprojektowana z myślą o rejestrowaniu przemieszczających się obiektów wewnątrz budynku. Przykładowym zastosowaniem sieci może być wykrywanie osób przechodzących przez korytarz. W związku z tym każdy z węzłów sensorowych został wyposażony w czujnik oświetlenia, który mierzy natężenie oświetlenia, a jego poziom wyraża w postaci napięcia elektrycznego.

Podczas przeprowadzenia testów opracowanej sieci sensorowej zaobserwowano zwiększone zużycie energii, które było spowodowane retransmisjami występującymi w przypadku nieprawidłowo zsynchronizowanych węzłów sensorowych. Należy zauważyć, że węzły podrzędne wysyłają dane do węzła nadrzędnego zgodnie z harmonogramem podyktowanym przez zastosowanie techniki wielodostępu do kanału transmisyjnego z podziałem czasowym TDMA (ang. *Time-Division Multiple Access*) i wymagają okresowej synchronizacji w celu uniknięcia błędów transmisji wynikających z kolizji. Ponadto, jeżeli węzeł podrzędny nie będzie prawidłowo zsynchronizowany, przesyłane przez niego dane mogą być nieprawidłowo odebrane przez węzeł nadrzędny. We wspomnianej sytuacji, gdy transmisja danych nie zakończy się powodzeniem, moduły komunikacji bezprzewodowej dokonują retransmisji, co prowadzi do zwiększenia poboru energii w danym węźle oraz do skrócenia czasu życia całej sieci sensorowej.

Wpływ częstotliwości synchronizacji na zużycie energii przez węzeł sensorowy został przedstawiony na rys. 6.2. Zaprezentowane wyniki dotyczą dwóch różnych okresów synchronizacji (5 i 10 minut). W pierwszym przypadku węzeł nadrzędny zużył średnio 264 mWh energii, natomiast węzeł podrzędny 189 mWh. Po wydłużeniu okresu synchronizacji do 10 minut średnie zużycie energii w węźle nadrzędnym wzrosło do 268 mWh, a w węźle podrzędnym do 194 mWh. Węzły sensorowe zużywają mniej energii, gdy synchronizacja jest wykonywana co 5 minut, ponieważ w tym przypadku unika się częstych retransmisji. Liczba prowadzonych retransmisji jest mniejsza, gdy węzły sensorowe są lepiej zsynchronizowane i wysyłają swoje dane w przydzielonych im slotach, dokładnie w czasie kiedy węzeł nadrzędny ich oczekuje. W przypadku, gdy synchronizacja jest realizowana w odstępach 10 minutowych, liczba nadmiarowych transmisji danych wykonywanych poza określonymi slotami czasowymi wzrasta. Jest to związane z wystąpieniem problemu rywalizacji o dostęp do medium transmisyjnego, a niepoprawnie przesłane dane są transmitowane ponownie przy najbliższej okazji, gdy jest to możliwe. Ponadto, warto zauważyć, że zwiększony pobór energii można zaobserwować na każdym węźle bez względu na pełnioną przez niego rolę. Zwiększone zużycie energii w węźle nadrzędnym jest związane z dłuższym czasem aktywności węzła, co wynika z wydłużonego czasu odbioru danych. Moduł komunikacyjny ZigBee nie przechodzi w tryb uśpienia dopóki nie zakończy procesu odbioru

lub transmisji danych. W oparciu o uzyskane wyniki badań, podczas dalszych eksperymentów, przyjęto okres synchronizacji wynoszący 1 minutę.

Na podstawie rysunku 6.2 można zaobserwować zależności pomiędzy liczbą przeprowadzonych transmisji danych, a zużyciem energii przez węzeł sensorowy. Podczas analizy wyników należy zauważyć, że dla węzła podrzędnego zużycie energii wzrasta wraz z zwiększającym się prawdopodobieństwem transmisji danych. W przypadku węzła nadrzędnego jego zużycie energii nie zmienia się znacząco w funkcji prawdopodobieństwa transmisji danych, ponieważ węzeł nadrzędny przesyła zbiorcze wyniki do stacji bazowej w każdym kroku pracy sieci.



Rys. 6.2: Wpływ okresu synchronizacji na zużycie energii przez węzły sensorowe

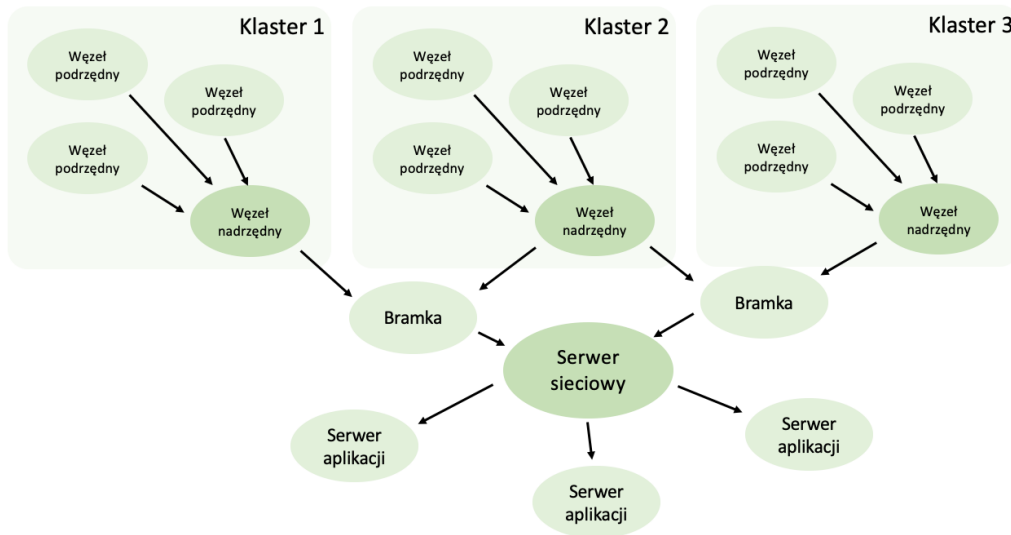
## 6.2 Parametry zużycia energii dla sieci LoRaWAN

Algorytmy transmisji danych stanowiące przedmiot niniejszej pracy, w szczególności algorytmy zmiany węzła nadrzędnego, mogą być implementowane w różnego rodzaju sieciach sensorowych, bazujących na różnych technologiach łączności bezprzewodowej. Aby potwierdzić uniwersalność proponowanych metod przygotowano fizyczne środowisko badawcze, które oparto na zyskującej popularność technologii LoRaWAN [169].

Sieć sensorowa LoRaWAN może się składać z węzłów (nadrzędnych oraz podrzędnych), bramek (koncentratorów), serwera sieciowego (stacja bazowa) oraz serwerów aplikacji, co przedstawiono na rys. 6.3. Projektując sieć sensorową wykorzystującą omawianą technologię, przyjęto założenie, że dane przesyłane przez węzeł nadrzędny mogą być odbierane przez wiele bramek [170].

Oprogramowanie uruchomione na bramce jest odpowiedzialne za przekazywanie przychodzącego ruchu do serwera sieciowego. Proces ten może być realizowany poprzez użycie sieci komórkowej, Ethernetu, WiFi lub przy pomocy technologii satelitarnej. W kolejnym etapie, serwer sieciowy pośredniczy w przesyłaniu komunikatów LoRaWAN, przekazując dane do nadrzędnych serwerów aplikacji. Oprócz przedstawionego schematu przesyłania danych możliwa jest również transmisja bezpośrednia, pomiędzy węzłami końcowymi, co wykorzystano podczas przeprowadzonych badań.





Rys. 6.3: Przepływ danych w sieci LoRaWAN

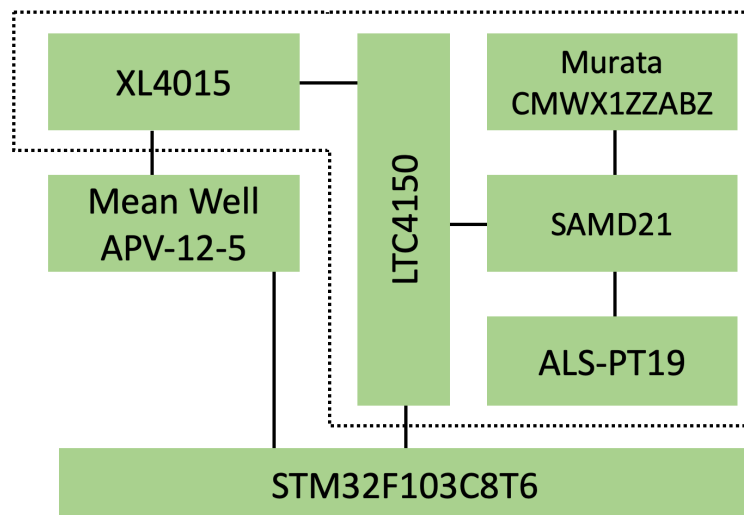
Pojedyncza bramka LoRaWAN jest w stanie objąć zasięgiem duży obszar [171]. Jest on uzależniony od napotkanych przeszkód architektonicznych, takich jak budynki, drzewa czy wzgórza. Zasięg może być ograniczony nie tylko przez niesprzyjające warunki atmosferyczne, ale także techniczne, takie jak wysoki poziom interferencji radiowych czy zastosowany typ anteny. Pomimo wspomnianych ograniczeń omawiana technologia, w porównaniu do standardów takich jak: Bluetooth, ZigBee czy WiFi, cechuje się większym zasięgiem transmisji oraz niższym poborem energii, dlatego z powodzeniem może ona zastąpić niektóre węzły istniejących już sieci sensorowych. Dotyczy to przede wszystkim węzłów, które cechują się niewielkim obciążeniem oraz niskim wymogiem odnośnie prędkości transmisji danych. Z uwagi na ograniczenia technologiczne, moduły radiowe LoRaWAN służą do obserwacji wielkości wolnozmiennych, takich jak: temperatura powietrza, ciśnienie atmosferyczne, intensywność opadów itp. Pomimo ograniczeń tej technologii istnieje szereg obszarów jej zastosowania, które obejmują monitoring jakości powietrza [172], systemy sterowania oświetleniem ulicznym [173], rolnictwo [174] czy systemy nawadniania roślin [175].

Na podstawie przeglądu dostępnych rozwiązań zdecydowano, że fizyczny model sieci sensorowej dla technologii LoRaWAN zostanie zbudowany z wykorzystaniem modułów opartych na płytkach prototypowych Arduino MKR WAN 1310. Wspomniana płytka prototypowa oferuje łączność z chmurą obliczeniową IoT Cloud, istniejącą infrastrukturą LoRaWAN, taką jak The Things Network, oraz innymi płytkami korzystającymi z trybu łączności bezpośredniej. Płytkę prototypową składa się z trzech niezależnych bloków: 32-bitowego mikrokontrolera rodziny SAMD21 opartego na rdzeniu ARM Cortex-M0, modułu łączności bezprzewodowej Murata CMWX1ZZABZ oraz układu scalonego ECC508, który służy do sprzętowego wsparcia szyfrowania transmisji danych. Warto odnotować jest fakt, że producent przewidział również blok stabilizacji napięcia zasilania. W przypadku zasilania bateryjnego istnieje możliwość odłączenia go od pozostałej części układu, co pozytywnie wpłynie na zmniejszenie zużycia energii

przez węzeł. W takim przypadku należy mieć na uwadze, aby napięcie zasilania nie przekraczało 3,3V, ponieważ może wówczas dojść do uszkodzenia układu. W przypadku wprowadzenia mikrokontrolera oraz modułu radiowego w tryb głębokiego uśpienia odnotowano pobór prądu na poziomie 16.6  $\mu\text{A}$ , co może przełożyć się na długi czas pracy węzła sieci sensorowej. Z uwagi na relatywnie długi czas inicjalizacji modułu radiowego LoRaWAN Zdecydowano, że krok pracy sieci będzie odpowiadał jednej sekundzie. Proces synchronizacji węzłów realizowano w jednoczynowych odstępach.

Algorytmy przekazywania roli węzła nadrzędnego zaimplementowano na mikrokontrolerze SAMD21, a układ rodziny STM32 wraz z modułem LTC4150 uczestniczy w procesie pomiarów zużycia energii przez dany węzeł sieci, co przedstawiono na rys. 6.4 (linią przerywaną zaznaczono moduły będące na wyposażeniu pojedynczego węzła sensorowego). Podczas prowadzenia badań zastosowano zasilacz stabilizowany Mean Well APV-12-5 oraz przetwornicę typu step-down opartą na układzie XL4015, która dodatkowo obniża napięcie zasilania do wymaganego przez płytkę prototypową poziomu 3,3V. Metoda wyznaczenia zużycia energii była identyczna jak w przypadku sieci opartej na technologii ZigBee, a pomiar zużycia energii był realizowany w okresie obejmującym 43200 kroków działania każdego z węzłów.

Na podstawie przeprowadzonych badań odnotowano, że węzeł nadrzędny zużył energię równą 838 mWh. W przypadku, gdy węzeł pełnił rolę węzła podrzędnego, lecz nie przesyłał danych do węzła nadrzędnego układ pomiarowy odnotował zużycie energii na poziomie 655 mWh. W sytuacji, gdy węzeł podrzędny nie dokonywał transmisji danych, zużył on energię wynoszącą 40 mWh. Dzieląc uzyskane wyniki pomiarów przez liczbę kroków, w których dokonano pomiarów, wyznacza się wartość parametru  $S_{CH}$ ,  $S_{TRANS}$  oraz  $S_{NOTTRANS}$  wymagane dla algorytmu symulacyjnego (algorytm 11).



Rys. 6.4: Część eksperymentalnego stanowiska testowego dla jednego węzła sensorowego

Zestawienie wyników pomiarów zużycia energii przez węzły sensorowe przedstawiono w tabeli 6.1. Warto w tym miejscu przypomnieć, że zawarte w tabeli parametry, opisujące zużycie

energii przez węzeł sensorowy dotyczą trzech przypadków: gdy węzeł pełni rolę nadrzędną ( $S_{CH}$ ), gdy jako węzeł podrzędny transmituje dane do węzła nadrzędnego ( $S_{TRANS}$ ) oraz gdy, będąc węzłem podrzędnym nie przesyła danych ( $S_{NOTRANS}$ ).

Tabela 6.1: Energia przypadająca na jeden krok pracy węzła sensorowego w różnych przypadkach jego pracy

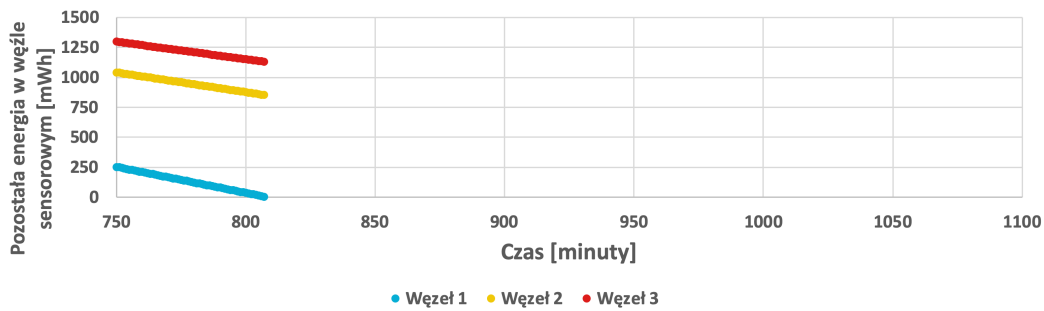
Parametr	Zużycie energii [mWh]	
	ZigBee	LoRaWAN
$S_{CH}$	0,036111	0,019403
$S_{TRANS}$	0,028819	0,015178
$S_{NOTRANS}$	0,022917	0,000939

## 6.3 Czas do rozładowania jednego węzła

Badania dotyczące efektywności algorytmów przekazywania roli węzła nadrzędnego zostały podzielone na dwa etapy, a każdy z etapów uwzględniał dwa różne scenariusze. Pierwszy etap przeprowadzonych eksperymentów zakłada, że baterie wszystkich węzłów są w pełni naładowane. Drugi etap uwzględnia różne początkowe poziomy energii dostępne w węzłach. Ocenę testowanych algorytmów realizuje się dla dwóch przypadków. Pierwszy z nich zakłada stałe prawdopodobieństwo transmisji danych w czasie. W tym przypadku wspomniane prawdopodobieństwo dla węzłów sensorowych 1–3 zostało ustalone odpowiednio na poziomie 0,2, 0,3 i 0,5. Druga część badań dotyczy sytuacji, w której prawdopodobieństwo transmisji jest zmienne w czasie. Podczas eksperymentów, w każdym kroku pracy sieci losowano z zadaniem prawdopodobieństwem czy dane będą przesyłane z poszczególnych węzłów podrzędnych. Zmiany prawdopodobieństwa następowały co 5 minut, w cyklach 15-minutowych. W przypadku pierwszego węzła pomiarowego prawdopodobieństwo dla trzech kolejnych 5-minutowych przedziałów wynosiło 0,2, 0,2 i 0,3. W podobny sposób przypisano prawdopodobieństwo 0,6, 0,7 i 0,9 dla drugiego węzła, trzeci węzeł sensorowy dokonywał transmisji danych z prawdopodobieństwami 0,1, 0,4 i 0,1. Podczas przeprowadzanych eksperymentów założono, że węzły sensorowe dysponują baterią o pojemności 700 mAh. Zatem można przyjąć, że moment rozładowania baterii danego węzła jest równoznaczny ze zużyciem przez węzeł energii o wartości 3500 mWh w przypadku technologii ZigBee oraz 2310 mWh w przypadku modułów radiowych LoRaWAN. Różnice wynikają z innego napięcia zasilającego węzły sensorowe: 5 V dla technologii ZigBee oraz 3,3 V dla LoRaWAN.

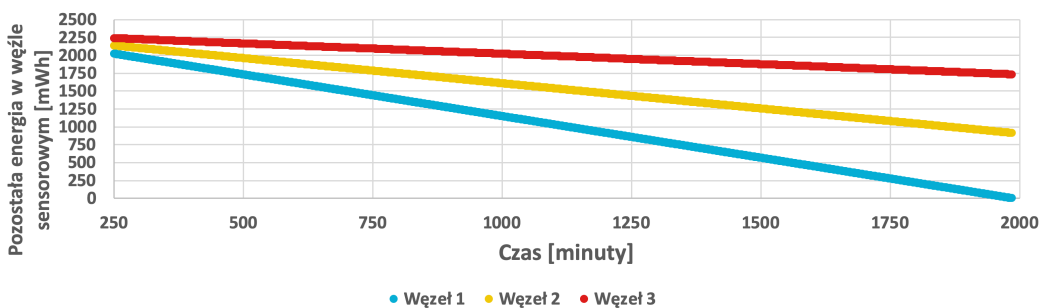
Pierwszy etap eksperymentów rozpoczęto od analizy czasu życia sieci opartej na technologii ZigBee, w sytuacji w której wszystkie węzły posiadały w pełni naładowaną baterię, a prawdopodobieństwo transmisji danych oraz rola węzła nadrzędnego były stałe. W opisanym przypadku czas życia sieci wyniósł 13 godzin i 28 minut. Po wyczerpaniu się baterii węzła nadrzędnego, pozostałe węzły miały ponad 851 mWh niewykorzystanej energii co przedstawiono na rys. 6.5. Z uwagi na fakt, że rola węzła nadrzędnego nie była przekazywana, takie

same wyniki czasu życia sieci odnotowuje się dla obu analizowanych scenariuszy (ze stałym i zmiennym prawdopodobieństwem transmisji danych).



Rys. 6.5: Zużycie energii przez węzły sensorowe bez przekazywania roli węzła nadrzędnego (technologia ZigBee, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe oraz zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

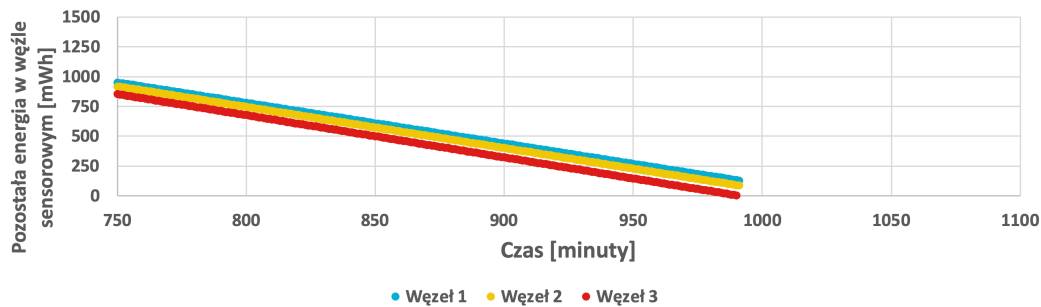
W przypadku takiego samego scenariusza badań z wykorzystaniem technologii LoRaWAN, sieć realizowała swoje zadanie przez 33 godziny i 6 minut co zostało przedstawione na rys. 6.6. Po wyczerpaniu się baterii węzła nadrzędnego pozostałe węzły miały ponad 912 mWh niewykorzystanej energii. Podobnie jak miało to miejsce w przypadku technologii ZigBee takie same wyniki czasu życia sieci odnotowuje się dla obu analizowanych scenariuszy (o stałym i zmiennym prawdopodobieństwie transmisji danych). Wspomniana sytuacja jest związana z działaniem węzła nadrzędnego, który musi przekazać zebrane dane do stacji bazowej w każdym kroku działania sieci niezależnie od prawdopodobieństwa transmisji danych. Dłuższy czas życia sieci w przypadku wykorzystania modułów transmisji bezprzewodowej LoRaWAN wynika z relatywnie niskiego poboru energii przypadającego na krok działania węzła wykorzystującego wspomnianą technologię.



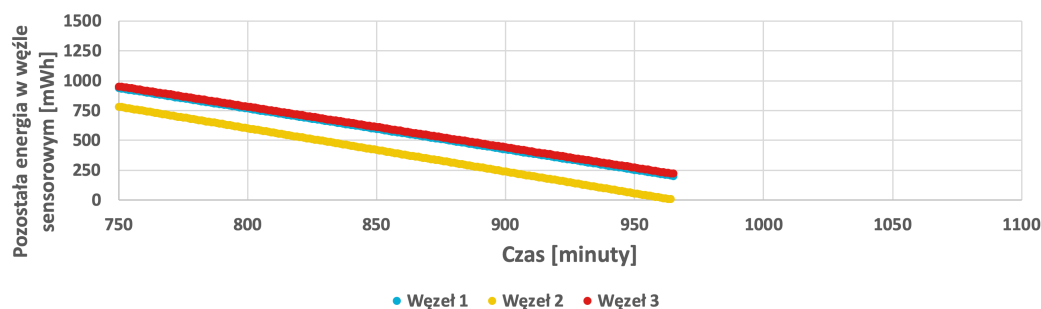
Rys. 6.6: Zużycie energii przez węzły sensorowe bez przekazywania roli węzła nadrzędnego (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe oraz zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

Pierwszym z badanych algorytmów mających na celu wydłużenie czasu życia sieci jest LEACH. Wspomniana metoda, cechuje się przydzielaniem roli węzła nadrzędnego każdemu z dostępnych węzłów na jednakowy okres czasu. Na podstawie badań wstępnych, podczas przeprowadzania eksperymentów przydział czasu został ustalony na jedną minutę. Czas życia sieci

bazującej na technologii ZigBee przedstawiono na rys. 6.7 oraz 6.8. W scenariuszu o stałym prawdopodobieństwie transmisji czas życia sieci wyniósł 16 godzin 31 minut, natomiast w scenariuszu o zmiennym prawdopodobieństwie czas życia zmniejszył się do 16 godzin i 5 minut. Należy zauważyć, że pod koniec pracy sieci w przypadku scenariusza o stałym prawdopodobieństwie przesyłania danych, dwa węzły sensorowe miały odpowiednio 126 i 85 mWh niewykorzystanej energii. W drugim badanym przypadku węzłom pozostało 201 i 219 mWh dostępnej energii.



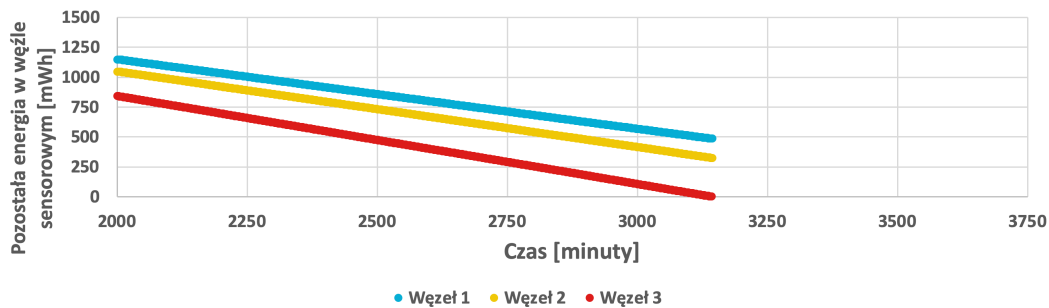
Rys. 6.7: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody LEACH (technologia ZigBee, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)



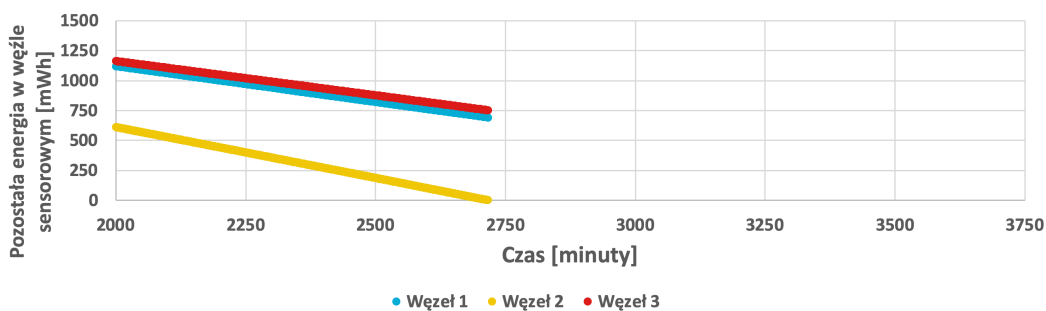
Rys. 6.8: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody LEACH (technologia ZigBee, jednakowe poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

Czas życia sieci sensorowej w przypadku wykorzystania technologii LoRaWAN przedstawiono na rys. 6.9. Na podstawie tych wyników można wywnioskować, że metoda LEACH jest najbardziej efektywna w scenariuszu o stałym prawdopodobieństwie transmisji danych, dla którego czas życia wyniósł 52 godziny i 24 minuty. W przypadku zmiennej liczby transmisji danych, czas życia zauważalnie spada do poziomu 45 godzin i 18 minut, co zostało przedstawione na rys. 6.10. W przypadku stałego prawdopodobieństwa przesyłu danych pozostałym węzłom pozostało odpowiednio 322 i 483 mWh. W drugim testowanym przypadku w węzłach nie wykorzystano 690 oraz 746 mWh dostępnej energii. Podczas porównania wyników z poprzednim podejściem można zaobserwować, że wprowadzenie mechanizmu przekazywania roli węzła nadrzędnego znacznie wydłuża czas życia sieci. Na podstawie przedstawionych wyników wykazano,

że dostępne w węzłach zasoby energetyczne wykorzystywane są w sposób nieoptymalny. Potwierdza to fakt, że po zakończeniu pracy sieci sensorowej niektóre węzły nadal dysponują niewykorzystanymi zasobami energii. Przyczyną jest działanie algorytmu LEACH, który zakłada, że węzły sensorowe zużywają energię w tym samym tempie. Założenie to nie jest spełnione w przypadku, gdy węzeł przesyła dane z różną częstotliwością, np. w przypadku stosowania techniki pomijania przesłania nadmiarowych danych.



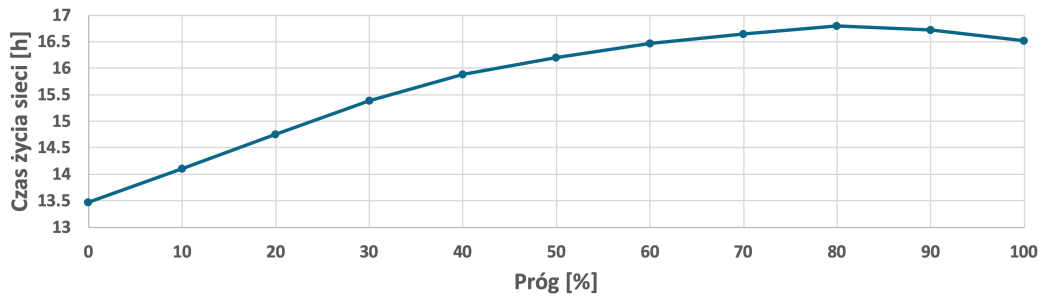
Rys. 6.9: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody LEACH (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)



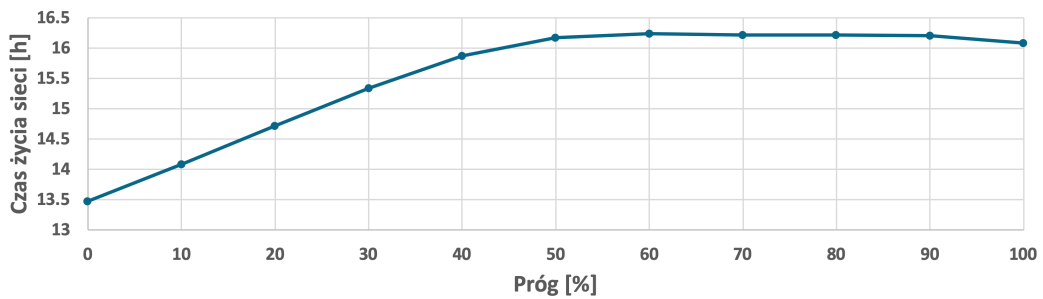
Rys. 6.10: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody LEACH (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

Dalszą poprawę czasu życia sieci osiągnięto poprzez zastosowanie algorytmu EDCR, który uwzględnia zużycie energii przez węzeł pełniący rolę węzła nadrzędnego. Zgodnie algorytmem EDCR rola nadrzędna jest przekazywana do kolejnego węzła, jeżeli zdefiniowany na etapie kalibracji procent dostępnej w węzle energii zostanie wykorzystany. Po procesie kalibracji zastosowano próg energetyczny wynoszący 80% dla stałych prawdopodobieństw transmisji i 60% dla zmiennych prawdopodobieństw transmisji. Wyniki stanowiące podstawę kalibracji zostały przedstawione na rys. 6.11 oraz 6.12. Wyniki algorytmu EDCR dla stałego i zmiennego w czasie prawdopodobieństwa transmisji danych przedstawiono na rys. 6.13 oraz 6.14. W przypadku, gdy prawdopodobieństwo transmisji jest stałe, czas życia sieci wynosi 16 godzin i 48 minut. Jak pokazano na rys. 6.14, jeżeli wspomniane prawdopodobieństwo jest zmienne, czas życia sieci skraca się do 16 godzin i 14 minut. Rys. 6.15 oraz 6.16 ilustrują działanie algorytmu EDCR w aspekcie przekazywania roli węzła nadrzędnego. Podczas analizy tych wykresów można zaobserwować, że zmiana roli węzła nadrzędnego dokonywana jest stosunkowo rzadko na początku

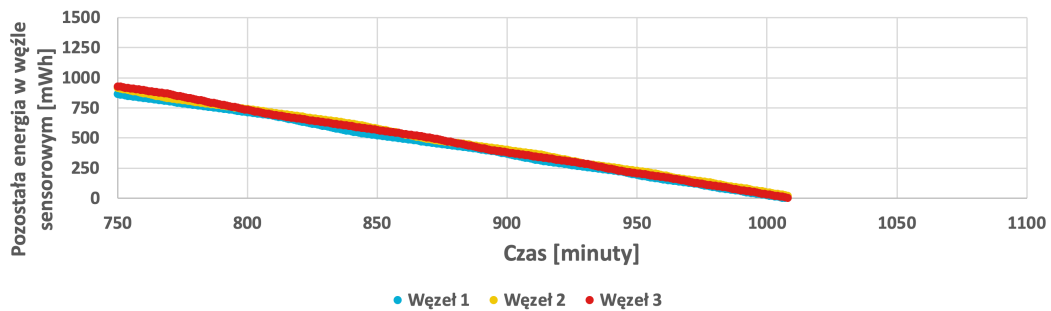
pracy sieci, w momencie, gdy węzły posiadają duże zasoby energetyczne. W miarę wyczerpywania się energii zgromadzonej w bateriach poszczególnych węzłów, zmiany roli węzła nadrzędnego dokonywane są coraz częściej, aż do fazy końcowej w której zmiana dokonywana jest co minutę.



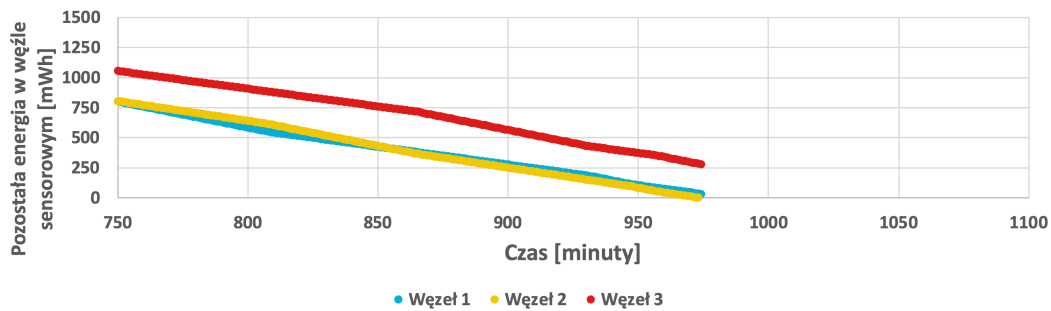
Rys. 6.11: Kalibracja algorytmu EDCR dla czasu  $LT_O$  (technologia ZigBee, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)



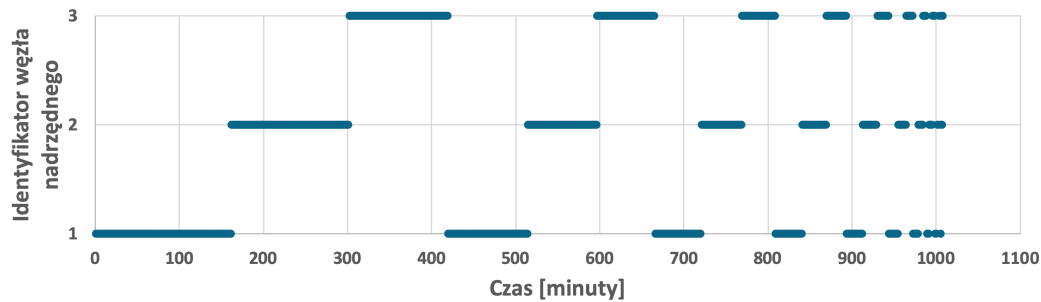
Rys. 6.12: Kalibracja algorytmu EDCR dla czasu  $LT_O$  (technologia ZigBee, jednakowe poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)



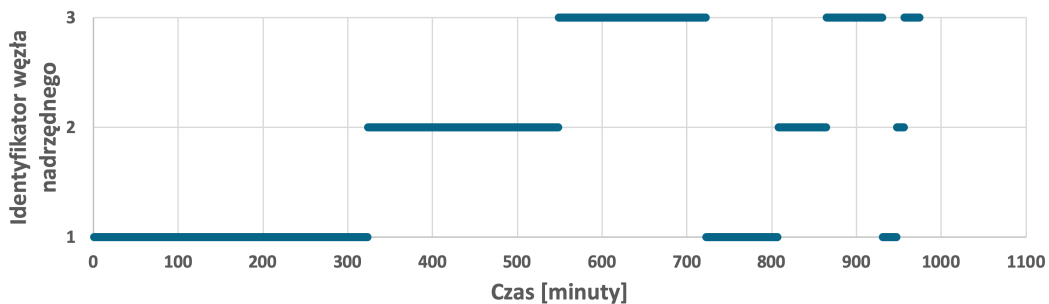
Rys. 6.13: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody EDCR (technologia ZigBee, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)



Rys. 6.14: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody EDCR (technologia ZigBee, jednakowe poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)



Rys. 6.15: Przekazywanie roli węzła nadrzędnego dla metody EDCR (technologia ZigBee, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)

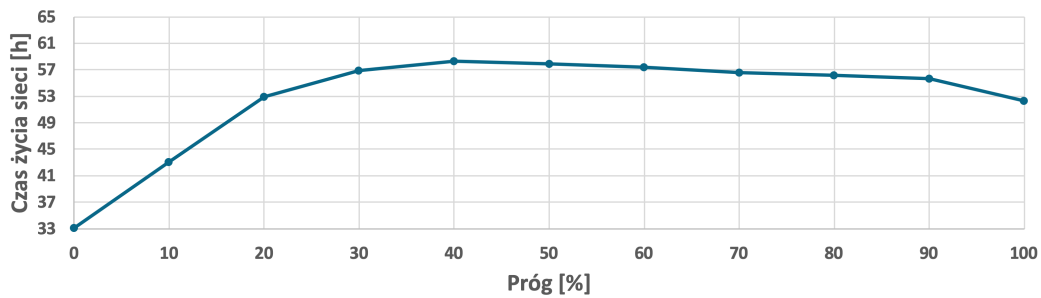


Rys. 6.16: Przekazywanie roli węzła nadrzędnego dla metody EDCR (technologia ZigBee, jednakowe poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

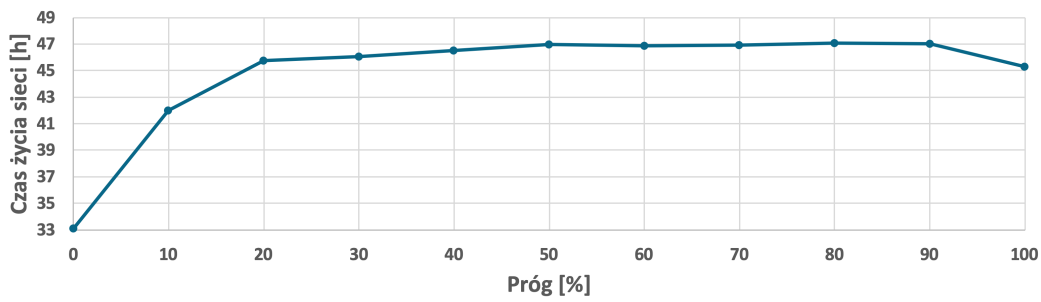
Czas życia sieci sensorowej w przypadku zastosowania technologii LoRaWAN przedstawiono na rys. 6.19 oraz 6.20. Po procesie kalibracji dla stałych w czasie prawdopodobieństw transmisji, zastosowano próg energetyczny równy 40%, natomiast w przypadku drugiego scenariusza badań przyjęto próg wynoszący 80%, co uzasadniają wyniki zaprezentowane przedstawione na rys. 6.17 oraz 6.18. Wyniki badań przedstawione na rys. 6.19 oraz 6.20 wykazują, że czas życia sieci dla algorytmu EDCR jest dłuższy w obu przypadkach względem podejścia LEACH. Algorytm EDCR pozwolił osiągnąć czas życia na poziomie 58 godzin i 15 minut oraz 47 godzin i 6 minut, odpowiednio w przypadku stałego i zmiennego prawdopodobieństwa przesyłania danych. W przypadku stałego prawdopodobieństwa transmisji danych osiągnięty



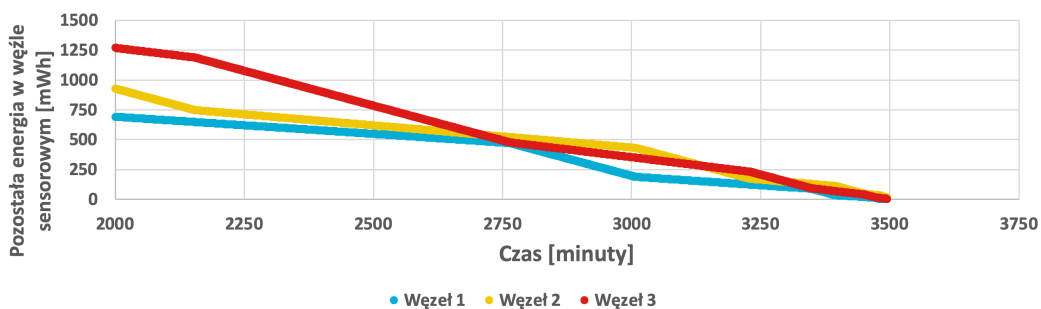
czas można uznać za optymalny, ponieważ w węzłach sensorowych pozostaje niewiele energii do wykorzystania (14 i 2 mWh). W sytuacji, gdy prawdopodobieństwo zmienia się w czasie istnieje wyraźna możliwość dalszego wydłużenia czasu życia sieci (pozostaje 466 i 619 mWh niewykorzystanej energii w węzłach).



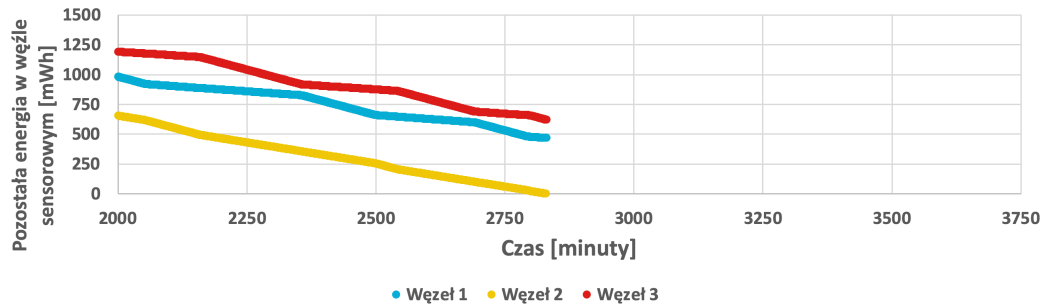
Rys. 6.17: Kalibracja algorytmu EDCR dla czasu  $LT_O$  (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)



Rys. 6.18: Kalibracja algorytmu EDCR dla czasu  $LT_O$  (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)



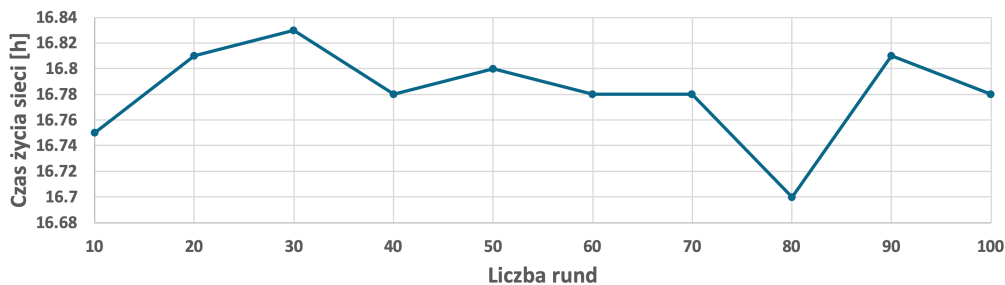
Rys. 6.19: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody EDCR (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)



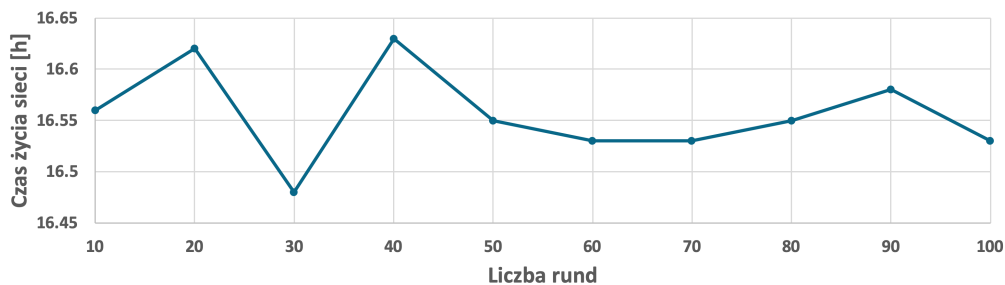
Rys. 6.20: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody EDCR (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

Algorytm EDCR uzależnia przekazywanie roli węzła nadrzędnego od pozostałej energii w węźle, jednak nie bierze on bezpośrednio pod uwagę prawdopodobieństwa transmisji. Niska skuteczność wydłużania czasu życia badanego podejścia wynika ze zbyt wolnego nadążania za zmianami prawdopodobieństwa transmisji w sieci. Efekt ten jest szczególnie widoczny w przypadku zastosowania technologii bezprzewodowej transmisji danych, gdzie występuje znacząca różnica w poborze energii pomiędzy stanami normalnej aktywności węzła, a trybem uśpienia modułu radiowego.

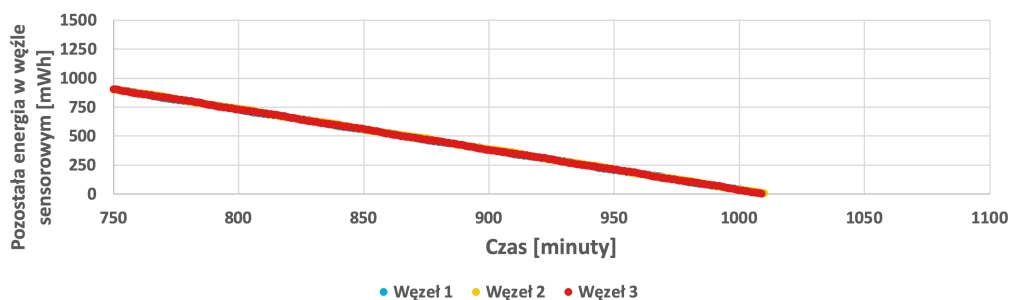
Wyniki uzyskane dla proponowanej metody zostały przedstawione na rysunkach 6.23 i 6.24. Proponowane podejście wymaga przeprowadzenia procesu kalibracji, którego celem jest wyznaczenie wartości parametru  $T$ . W sytuacji, gdy okres  $T$  jest krótki, wówczas działanie algorytmu będzie tożsame z podejściem opisanym w metodzie LEACH. W przypadku, gdy czas  $T$  jest zbyt długi, węzeł sensorowy nie będzie mógł adaptować się do zmian prawdopodobieństwa transmisji danych realizowanych przez węzły, co prowadzi tym do skrócenia czasu życia sieci. Po procesie kalibracji dla stałych prawdopodobieństw transmisji wartość parametru  $T$  określono na 30 rund natomiast w przypadku drugiego scenariusza badań przyjęto okres 40 rund, co uzasadniają wyniki przedstawione na rys. 6.21 oraz 6.22. W przypadku, gdy prawdopodobieństwo transmisji danych jest stałe, czas życia sieci został wydłużony do 16 godzin i 50 minut (rys. 6.23). Średnia pozostała energia w węźle sensorowym, która została odnotowana na koniec czasu życia sieci, wyniosła 6 mWh. Oznacza to, że w przypadku wykorzystania proponowanego rozwiązania, zasoby energetyczne węzłów sensorowych są prawie w pełni wykorzystane. Rysunek 6.24 przedstawia wyniki uzyskane dla drugiego scenariusza, w którym prawdopodobieństwo transmisji zmienia się w sposób cykliczny. We wspomnianym scenariuszu czas życia sieci wyniósł 16 godzin i 37 minut.



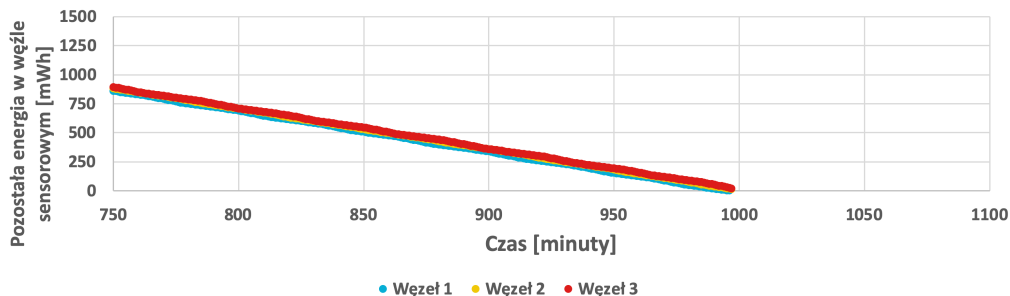
Rys. 6.21: Kalibracja proponowanego algorytmu PDCR dla czasu  $LT_O$  (technologia ZigBee, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)



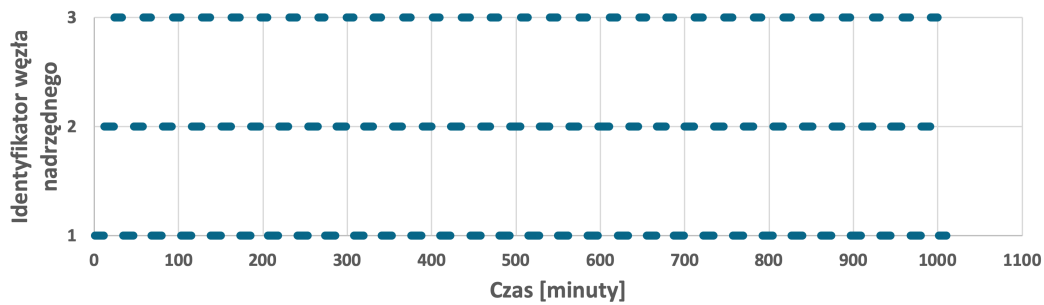
Rys. 6.22: Kalibracja proponowanego algorytmu PDCR dla czasu  $LT_O$  (technologia ZigBee, jednakowe poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)



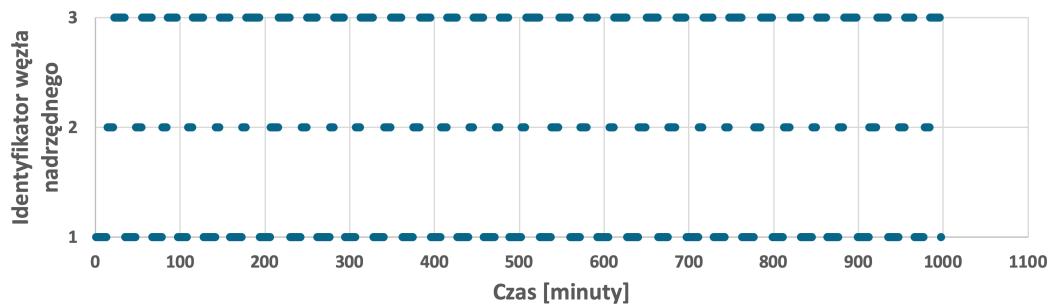
Rys. 6.23: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla proponowanej metody PDCR oraz czasu  $LT_O$  (technologia ZigBee, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)



Rys. 6.24: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla proponowanej metody PDCR oraz czasu  $LT_O$  (technologia ZigBee, jednakowe poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

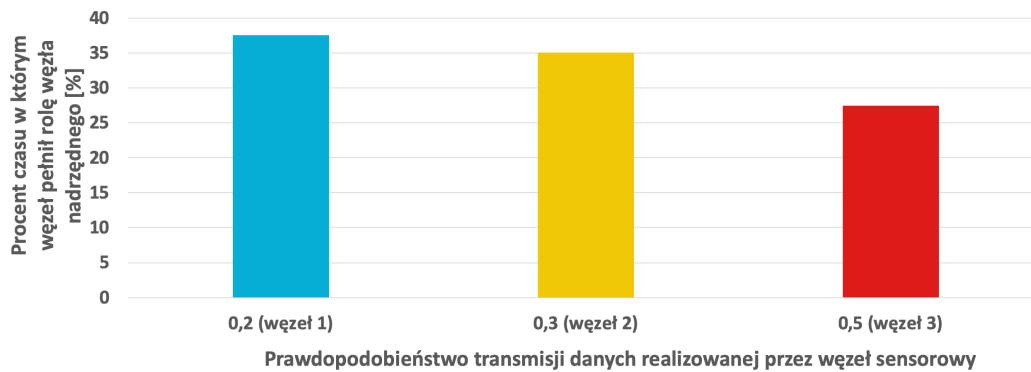


Rys. 6.25: Przekazywanie roli węzła nadrzędnego dla proponowanej metody PDCR oraz czasu  $LT_O$  (technologia ZigBee, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)



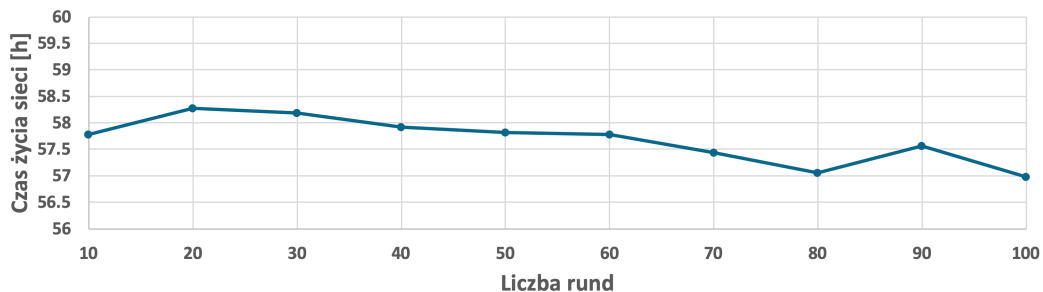
Rys. 6.26: Przekazywanie roli węzła nadrzędnego dla proponowanej metody PDCR oraz czasu  $LT_O$  (technologia ZigBee, jednakowe poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

Dodatkowo na rys. 6.27 przedstawiono zależność pomiędzy okresem, w którym węzeł pełni rolę węzła nadrzędnego, a prawdopodobieństwem przesyłania danych. Zagregowane wyniki odnoszą się do przykładu przedstawionego na rys. 6.23, gdzie każdy węzeł miał przypisane stałe prawdopodobieństwo przesyłania danych. Na podstawie omawianego wykresu można zauważyć, że im więcej transmisji jest realizowanych przez węzeł, tym krótszy jest jego udział w pełnieniu roli nadrzędnej. Prowadzi to do zrównoważenia zużycia energii wszystkich węzłów. W przypadku węzła 3, dla którego transmisje są wykonywane z największym prawdopodobieństwem, okres pełnienia roli nadrzędnej przyjmuje najniższą wartość (27.5%). Z drugiej strony, węzeł 1. ma najniższe spośród dostępnych węzłów prawdopodobieństwo transmisji danych i przyjmuje rolę nadrzędną na najdłuższy czas (37.5%).

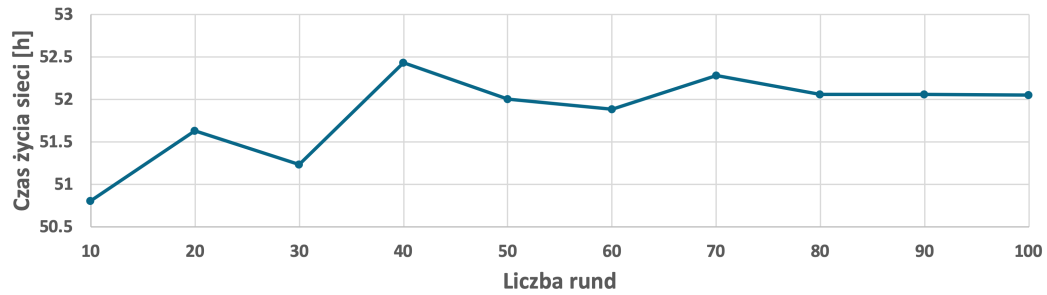


Rys. 6.27: Zależność okresu w którym węzeł pełni rolę nadzrędną od prawdopodobieństwa transmisji danych (technologia ZigBee)

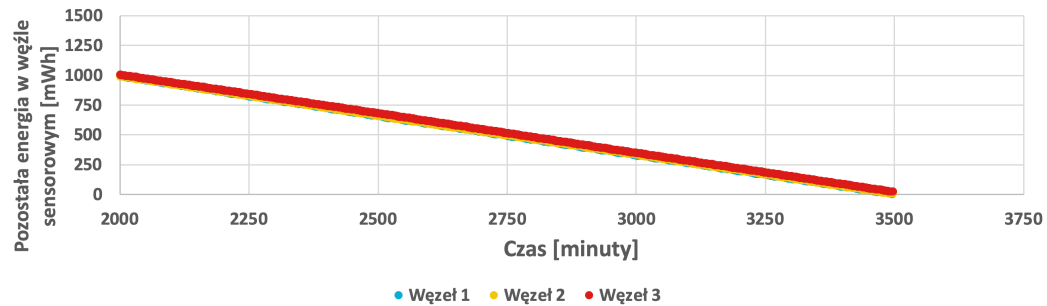
Czas życia sieci sensorowej w przypadku zastosowania technologii LoRaWAN przedstawiono na rys. 6.30 oraz 6.31. Po procesie kalibracji dla stałego prawdopodobieństwa transmisji zastosowano okres  $T$  wynoszący 20 rund, natomiast w przypadku drugiego scenariusza badań przyjęto  $T$  równe 40 rund, co uzasadniają wyniki przedstawione na rys. 6.28 oraz 6.29. W przypadku, gdy prawdopodobieństwo transmisji jest stałe, czas życia sieci sensorowej został wydłużony do 58 godzin i 17 minut. Podobny wynik zaobserwowano w przypadku algorytmu EDCR (58 godzin i 15 minut), jednak proponowane podejście szybciej reaguje na ewentualną potrzebę przekazania roli nadzrędnego. Na tej podstawie algorytm wydłuża czas życia sieci w przypadku zmiennego prawdopodobieństwa przesyłu danych, który wyniósł 52 godziny i 23 minuty oraz pozwala lepiej wykorzystać dostępne zasoby w węzle (39 i 145 mWh pozostałej energii do wykorzystania w węzłach sensorowych).



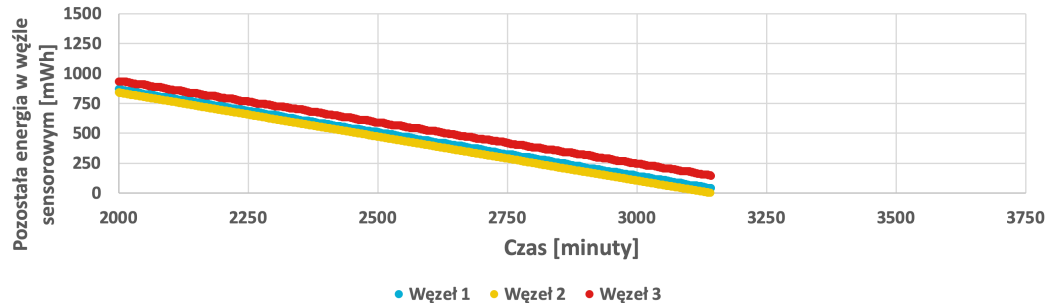
Rys. 6.28: Kalibracja proponowanego algorytmu PDCR dla czasu  $LT_O$  (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)



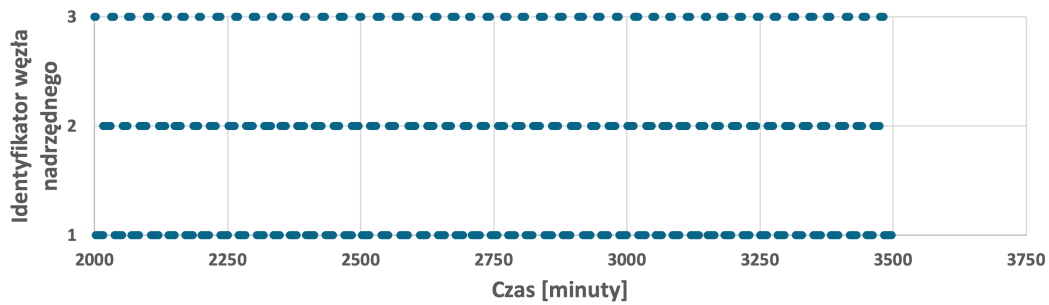
Rys. 6.29: Kalibracja proponowanego algorytmu PDCR dla czasu  $LT_O$  (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)



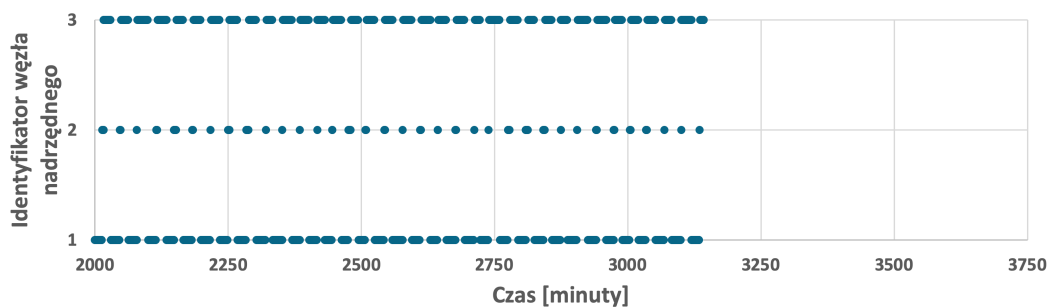
Rys. 6.30: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla proponowanej metody PDCR oraz czasu  $LT_O$  (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)



Rys. 6.31: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla proponowanej metody PDCR oraz czasu  $LT_O$  (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)



Rys. 6.32: Przekazywanie roli węzła nadrzędnego dla proponowanej metody PDCR oraz czasu  $LT_O$  (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)



Rys. 6.33: Przekazywanie roli węzła nadrzędnego dla proponowanej metody PDCR oraz czasu  $LT_O$  (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

Porównując wykresy przedstawione na rys. 6.25, 6.32 z rys. 6.26 i 6.33 można zaobserwować różnice czasów, w których poszczególne węzły pełnią rolę nadrzędną. Wynikają one z faktu, że proponowany algorytm umożliwia przekazanie roli nadrzędnej odpowiednio do aktualnie oszacowanych prawdopodobieństw transmisji danych dla każdego z węzłów sensorowych. Dzięki temu, wszystkie węzły zużywają zasoby energii w jednakowym tempie. Podczas analizy wyników badań przedstawionych na rys. 6.23 i 6.24, które prezentują zmniejszający się poziom energii poszczególnych węzłów w czasie pracy sieci, można zaobserwować, że przy zastosowaniu proponowanej metody, tempo zużycia energii przez wszystkie węzły sensorowe jest w przybliżeniu równe. W porównaniu z algorytmem EDCR adaptacja do zmian liczby transmisji jest wykonywana z mniejszym opóźnieniem. Powodem takiego działania algorytmu jest fakt, że decyzja o zmianie roli w EDCR jest podejmowana po zużyciu określonej z góry porcji energii. Proponowana metoda znacznie szybciej dostosowuje się do zmian zachodzących w sieci, ponieważ bezpośrednio uwzględnia prawdopodobieństwo transmisji danych i przewiduje zużycie energii przez węzły sensorowe. W przypadku implementacji proponowanego rozwiązania na wszystkich węzłach sensorowych, klaster efektywniej wykorzystuje dostępną energię, co bezpośrednio przekłada się na dłuższy czas życia sieci sensorowej. Należy zauważyć, że wynik działania algorytmu jest zbliżony do optimum, ponieważ wszystkie węzły sensorowe rozładują swoją baterię w tej samej rundzie. Podobne działanie algorytmu można zauważyć zarówno

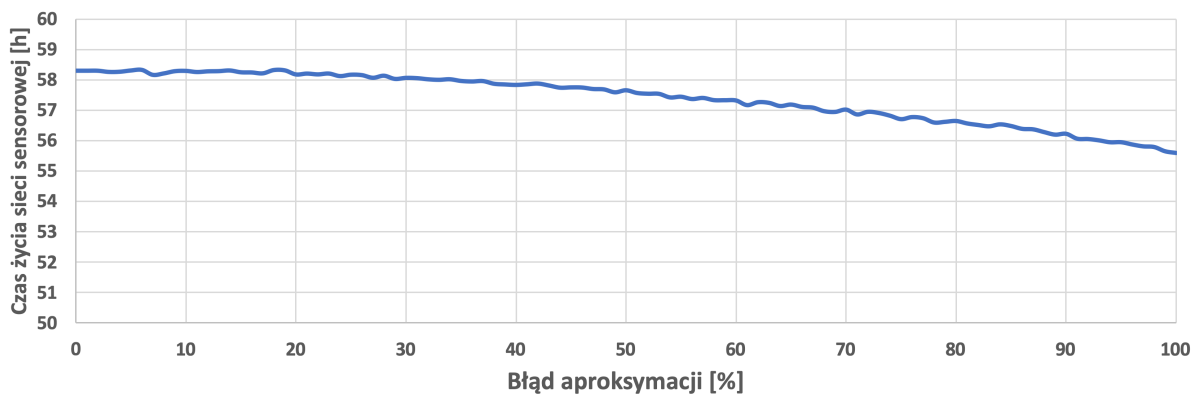
w przypadku sieci ZigBee, jak i LoRaWAN.

Eksperymenty obejmowały również analizę wpływu błędu aproksymacji rozwiązania układu równań (opisanego wzorem 4.4 w rozdziale 4.1) na czas życia sieci. Rozpatrywane błędy mogą zaistnieć np. w przypadku, gdy węzeł pełniący rolę nadrzędną w danej rundzie nie odbierze wszystkich przesłanych danych lub pierwiastki układu równań zostaną wyznaczone w sposób niedokładny. Podczas badań założono stałe prawdopodobieństwo transmisji danych, wynoszące 50% dla każdego węzła, a badanie czasu życia wykonano dla sieci wykorzystującej technologię LoRaWAN. Badanie wpływu błędu aproksymacji polegało na dokładnym wyznaczeniu pierwiastków układu równań, a następnie dodaniu do każdego z nich wartości losowej z odpowiedniego przedziału. Zmodyfikowaną wartość  $i$ -tego pierwiastka wyznaczano zgodnie ze wzorem:

$$z'_i = z_i + (u \cdot \Delta z_i), \quad (6.1)$$

gdzie  $z_i$  jest poprawnie wyznaczonym  $i$ -tym pierwiastkiem,  $\Delta z_i$  jest wartością losową spełniającą warunek taki, że  $\Delta z_i \in [-z_i, z_i]$ , natomiast  $u \in [0,1]$  oznacza błąd aproksymacji wprowadzany do końcowej wartości pierwiastka. Poziom błąd  $u$  był zmieniany w czasie trwania eksperymentu. Dla każdej analizowanej wartości błędu  $u$  wyznaczano czas życia sieci. Losowanie wartości  $\Delta z_i$  odbywało się zgodnie z rozkładem jednostajnym.

Wyniki eksperymentu przedstawiono na rys. 6.34. Jak można zaobserwować, w przypadku, gdy  $u = 1$  czas życia sieci zmniejszył się o 6 godzin i 20 minut (11%). Wartym odnotowania jest to, że w przypadku, gdy błąd aproksymacji wyniesie 40% ( $u = 0,4$ ), czas życia zmniejszył się zaledwie o 22 minuty (0,6%).

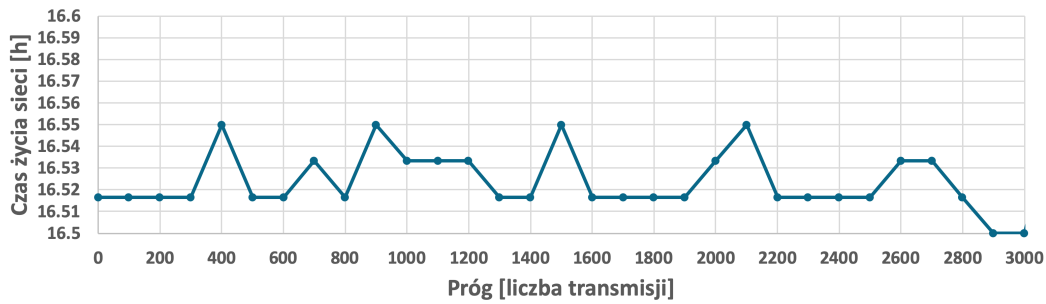


Rys. 6.34: Wpływ błędów aproksymacji pierwiastków układu równań na czas życia sieci sensorowej opartej na technologii LoRaWAN (stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)

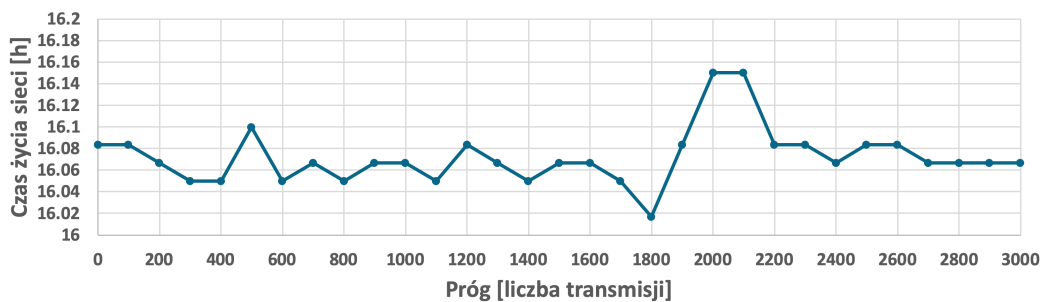
Dla celów porównawczych przetestowano odmianę zaproponowanej metody, tj. algorytm FDCR, który bierze pod uwagę liczbę przeprowadzonych transmisji. Algorytm nie przewiduje wyznaczania wartości parametru  $TCH_i$ , co również przekłada się na prostotę implementacji rozwiązania w poszczególnych węzłach sensorowych. Zgodnie z algorytmem FDCR, rola węzła nadrzędnego jest przekazywana do następnego węzła sensorowego, jeżeli zarejestrowana przez



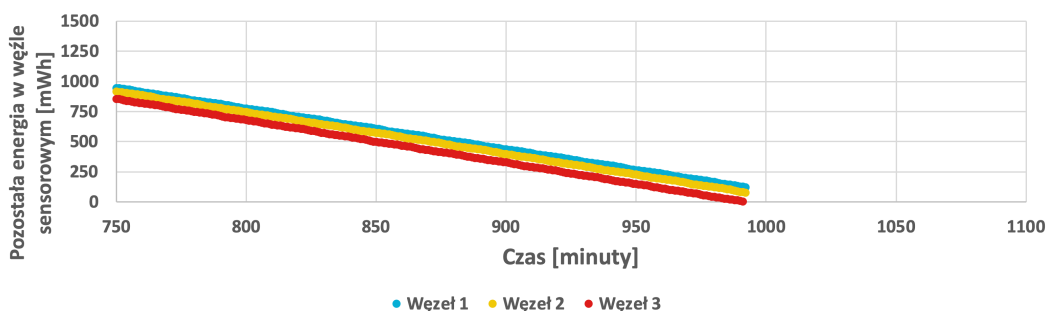
węzeł nadrzędny liczba transmisji pochodząca od wszystkich aktywnych węzłów osiągnie zdefiniowany próg. Wspomniany próg jest wyznaczany na etapie kalibracji, w sposób niezależny zarówno dla stałego (rys. 6.35) jak i zmiennego (rys. 6.36) prawdopodobieństwa transmisji. Na podstawie przeprowadzonego procesu kalibracji algorytmu FDCR przyjęto próg wynoszący odpowiednio 400 i 2000 transmisji. Wyniki badań przedstawionych na rys. 6.37 i 6.38 wykazują, że czas życia sieci dla algorytmu FDCR jest krótszy w porównaniu do wyników proponowanego algorytmu (16 godzin i 32 minuty w przypadku stałego prawdopodobieństwa transmisji i 16 godzin 8 minut w przypadku zmiennego prawdopodobieństwa transmisji).



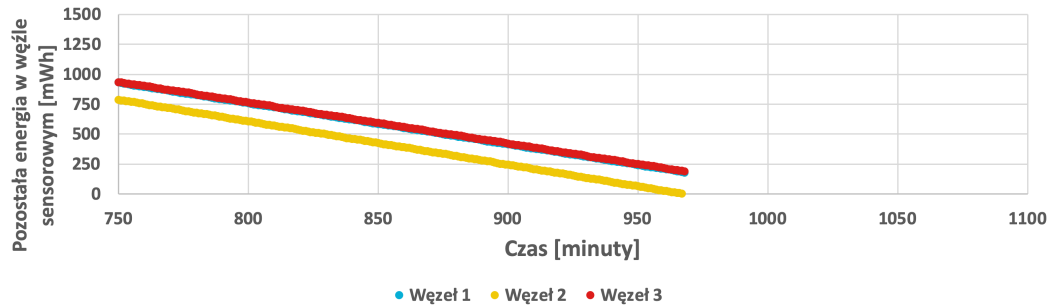
Rys. 6.35: Kalibracja algorytmu FDCR dla czasu  $LT_O$  (technologia ZigBee, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)



Rys. 6.36: Kalibracja algorytmu FDCR dla czasu  $LT_O$  (technologia ZigBee, jednakowe poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

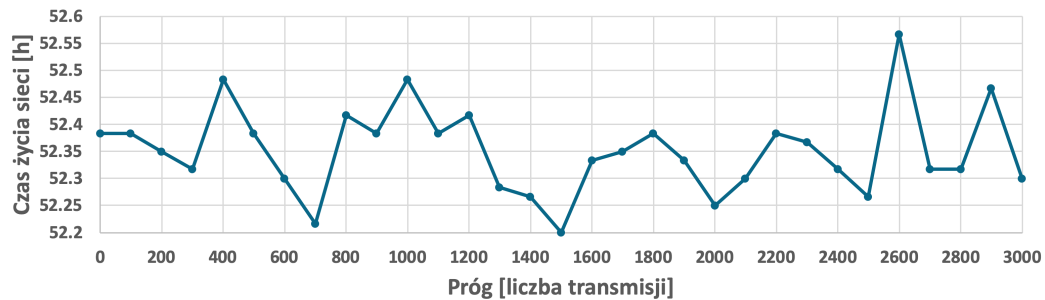


Rys. 6.37: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody FDCR (technologia ZigBee, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)

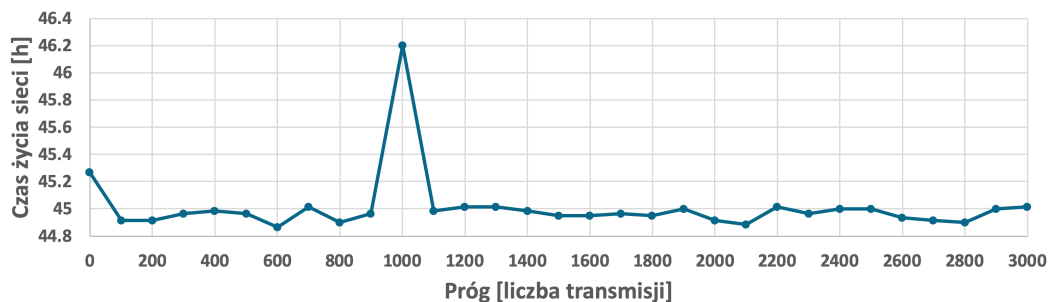


Rys. 6.38: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody FDCR (technologia ZigBee, jednakowe poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

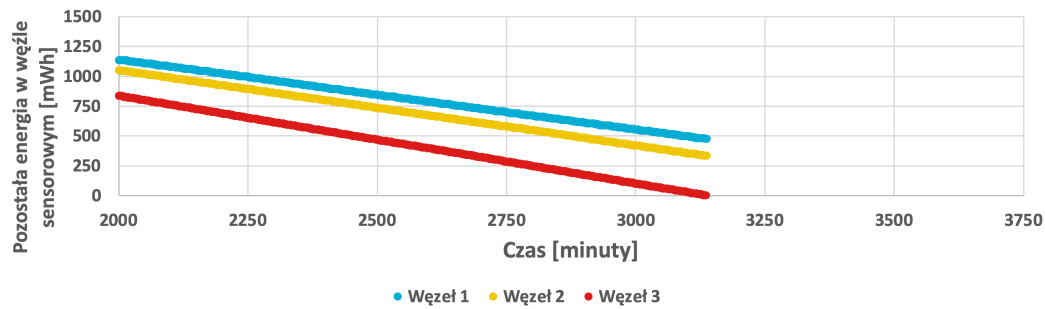
Czas życia sieci sensorowej w przypadku zastosowania technologii LoRaWAN przedstawiono na rys. 6.41 oraz 6.42. Podobnie jak ma to miejsce w przypadku algorytmu EDCR, przed dokonaniem oceny jakości badanego podejścia należy przeprowadzić proces kalibracji na podstawie którego przyjęto próg wynoszący odpowiednio 2600 i 1000 transmisji, co przedstawiono na rys. 6.40 i 6.40. Rys. 6.41 i 6.42 przedstawia wyniki badań, które dowodzą, że czas życia sieci sensorowej dla algorytmu FDCR jest krótszy w porównaniu do wcześniej badanych metod, z wyjątkiem metody LEACH (52 godziny i 17 minut w przypadku stałego prawdopodobieństwa transmisji i 46 godzin i 17 minut w przypadku zmiennego prawdopodobieństwa przesłania danych).



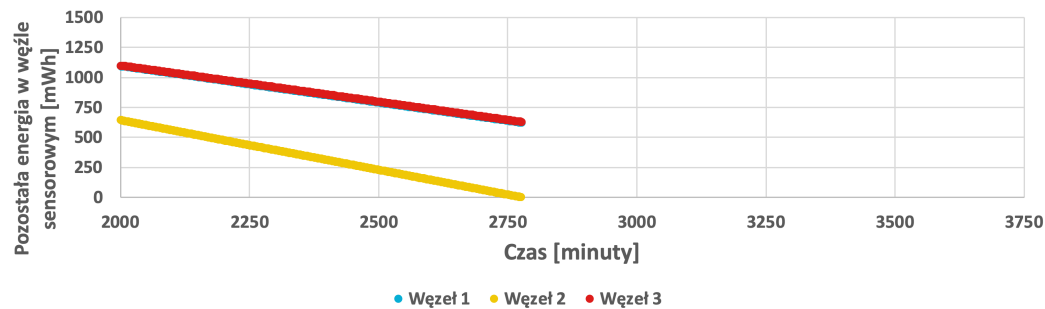
Rys. 6.39: Kalibracja algorytmu FDCR dla czasu  $LT_O$  (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)



Rys. 6.40: Kalibracja algorytmu FDCR dla czasu  $LT_O$  (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)



Rys. 6.41: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody FDCR (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)



Rys. 6.42: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody FDCR (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

Algorytm FDCR jest rozwiązaniem efektywnym wyłącznie, gdy węzły dokonują transmisji danych z jednakowym prawdopodobieństwem. Niższy czas życia sieci dla metody FDCR jest związany z ignorowaniem różnic pomiędzy liczbą transmisji zrealizowanych przez poszczególne węzły sensorowe.

Tabele 6.2 oraz 6.3 przedstawiają wyniki badań, które odpowiadają średnim czasom życia sieci sensorowej dla wszystkich rozpatrywanych metod, uwzględniając technologię ZigBee oraz LoRaWAN. W celu porównania omówionych wcześniej metod przebadano 10 różnych scenariuszy. Eksperymenty dotyczyły scenariuszy statycznych jak i dynamicznych, w których prawdopodobieństwo transmisji danych zmieniało się w czasie. Każdy spośród zmiennych w czasie scenariuszy zakładał inne zmiany prawdopodobieństwa przesłania danych w cyklach 15-minutowych. Przeprowadzone eksperymenty potwierdzają przewagę metod, które decydują o zmianie roli węzła nadrzędnego dokonując z uwzględnieniem dostępnej energii w węźle, nad metodami, w których rola węzła jest przekazywana po predefiniowanym czasie. Dodatkowo, przedstawione wyniki potwierdzają większą skuteczność w wydłużaniu czasu życia sieci proponowanych algorytmów w porównaniu z badanymi podejściami znanymi w literaturze. W celu wykazania istotności statystycznej prezentowanych wyników, przeprowadzony został test statystyczny Wilcoxa. Symbolem  $\uparrow$  oznaczono, że dany algorytm jest statystycznie lepszy od wszystkich badanych algorytmów.

Tabela 6.2: Czas  $LT_O$  dla porównywanych metod (technologia ZigBee, jednakowe poziomy energii początkowej węzłów)

Prawdopodobieństwo transmisji danych	Metoda	Czas życia sieci
Stałe	Bez zmiany roli węzła	13h 28m
	LEACH	16h 31m
	EDCR	16h 48m
	Proponowana metoda	16h 50m ↑
	FDCR	16h 32m
Zmienne	Bez zmiany roli węzła	13h 28m
	LEACH	16h 5m
	EDCR	16h 14m
	Proponowana metoda	16h 37m ↑
	FDCR	16h 8m

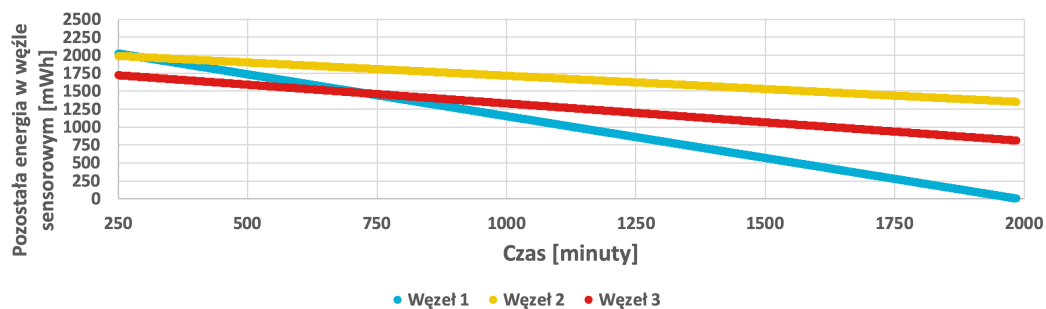
Tabela 6.3: Czas  $LT_O$  dla porównywanych metod (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej węzłów)

Prawdopodobieństwo transmisji danych	Metoda	Czas życia sieci
Stałe	Bez zmiany roli węzła	33h 6m
	LEACH	52h 24m
	EDCR	58h 15m
	Proponowana metoda	58h 17m ↑
	FDCR	52h 17m
Zmienne	Bez zmiany roli węzła	33h 6m
	LEACH	45h 18m
	EDCR	47h 6m
	Proponowana metoda	52h 23m ↑
	FDCR	46h 17m

Podczas wstępnych badań zaobserwowano problem z powtarzalnością pomiarów, który przejawiał się odnotowaniem różnych wyników poboru energii przez dany węzeł, pomimo że jego ustawienia nie były zmieniane. Na podstawie analizy problemu zauważono, że bezpośrednią przyczyną takiego zachowania się węzła są ograniczenia, które wynikają z budowy baterii, a mówiąc bardziej precyzyjnie z fizycznych oraz chemicznych procesów, które zachodzą podczas jego ładowania. Pomimo zastosowania dedykowanej ładowarki (Panasonic Eneloop BQ-CC55) nie udało się uzyskać takiego samego poziomu naładowania wszystkich baterii, które miały zasilć węzły sieci sensorowej. Rozwiązaniem zapewniającym osiągnięcie powtarzalności pomiarów było zastosowanie zasilacza oraz dodatkowego węzła, który mierzył zużycie energii. Z uwagi na fakt, że opracowane algorytmy mają za zadanie wydłużyć czas życia sieci w warunkach rzeczywistych, należy wziąć pod uwagę sytuację niepełnego naładowania baterii. Warty odnotowania jest fakt, że proponowany algorytm dopasowuje się również do sytuacji, gdy projektant sieci świadomie stosuje baterie o różnych pojemnościach nominalnych. Adaptacyjny charakter proponowanego algorytmu wynika z okresowego wyznaczania wartości parametru  $TCH_i$ , który

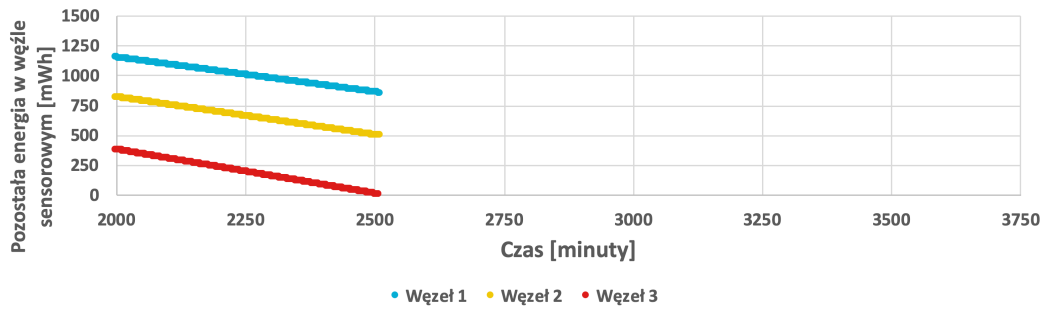
określa liczbę rund, podczas których węzeł  $i$  powinien pełnić rolę nadrzędną. Wspomniany parametr jest wyznaczany na podstawie liczby wykonanych przez węzeł transmisji danych oraz początkowego naładowania baterii  $EI_i$ . Na potrzeby przeprowadzenia eksperymentów wykorzystano sieć opartą na technologii LoRaWAN, która składała się z trzech węzłów. Wszystkie węzły posiadały baterię o różnym stopniu naładowania, wynoszącym odpowiednio 100, 90 oraz 80% nominalnej pojemności. We wszystkich algorytmach, które wymagają kalibracji przyjęto takie same progi jak w przypadku sieci, w której założono maksymalny poziom naładowania baterii.

Drugi etap przeprowadzonych eksperymentów rozpoczęto od scenariusza w którym rola węzła nadrzędnego nie zmienia się, zatem czas życia sieci zależy od początkowej pojemności baterii pierwszego węzła. Najbardziej sprzyjającym przypadkiem dla osiągnięcia długiego czasu życia takiej sieci jest sytuacja, gdy rolę węzła nadrzędnego realizuje węzeł, który posiada w pełni naładowaną baterię, co przedstawiono na rys. 6.43. W opisywanym przypadku czas życia sieci wyniósł 33 godziny i 6 minut. Po wyczerpaniu się baterii węzła nadrzędnego, w przypadku stałego prawdopodobieństwa transmisji danych, pozostałe węzły miały średnio 1078 mWh niewykorzystanej energii.

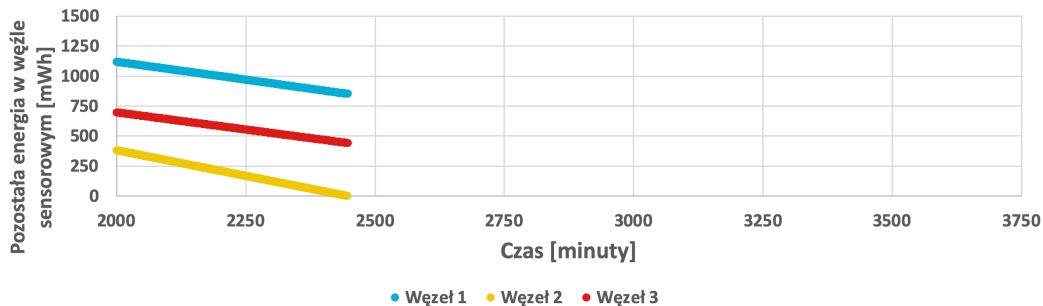


Rys. 6.43: Zużycie energii przez węzły sensorowe bez przekazywania roli węzła nadrzędnego (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej, stałe oraz zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

Pierwszym badanym algorytmem przekazywania węzła nadrzędnego jest LEACH, który obarczony jest ograniczeniami wynikającymi z przyjęcia założeń upraszczających odnośnie działania sieci sensorowej. Algorytm LEACH zapewnia długi czas życia sieci w przypadku, gdy wszystkie węzły posiadają taką samą początkową pojemność baterii, a zużycie energii, które przypada na jednostkę czasu pracy węzła jest zawsze takie samo. Niestety, w praktyce niemożliwe jest zapewnienie takich warunków pracy węzłów w sieci sensorowej. Z tego powodu badane podejście, w porównaniu z innymi algorytmami, odnotowuje najniższy czas życia sieci. Czas życia sieci w przypadku stałego prawdopodobieństwa transmisji danych wyniósł 41 godzin i 51 minut, a w pozostałych węzłach pozostało odpowiednio 850 i 492 mWh dostępnej energii, co przedstawiono na rys. 6.44. W scenariuszu uwzględniającym zmienne prawdopodobieństwo przesyłu danych, czas życia skrócił się do 40 godzin i 47 minut, przy czym w węzłach pozostało 849 i 440 mWh energii do wykorzystania, co przedstawiono na rys. 6.45.



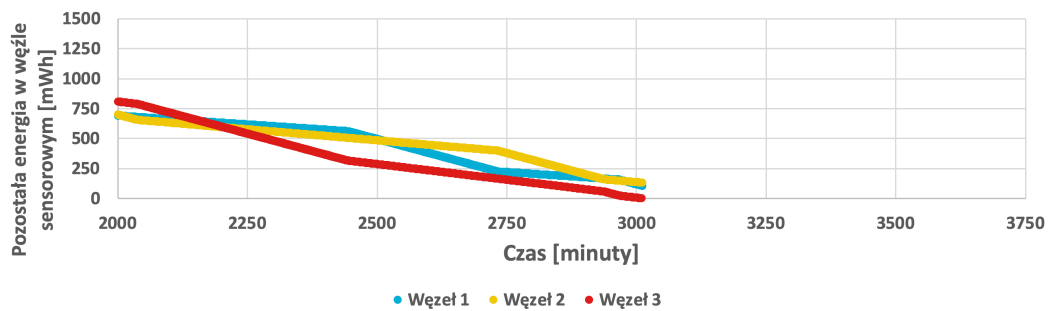
Rys. 6.44: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody LEACH (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)



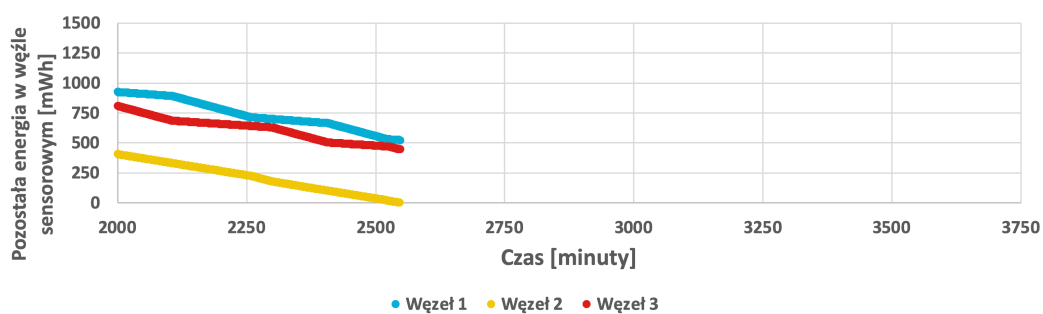
Rys. 6.45: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody LEACH (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

Kolejnym badanym podejściem jest algorytm EDCR. Jego działanie wymaga ustalenia progu, którego przekroczenie skutkuje przekazaniem roli węzła nadrzędnego. W praktyce, wyznaczenie tego parametru jest zadaniem trudnym, ponieważ wartość progowa bazuje na danych historycznych, na przykład zgromadzonych z poprzedniego dnia. Na podstawie analizy działania algorytmu, wyznaczenie progu powinno być realizowane dynamicznie (co może być podstawą do dalszej pracy nad rozwojem algorytmu). W przeciwnym przypadku możliwe jest odnotowanie lawinowego spadku czasu życia sieci. Na podstawie wcześniej przeprowadzonej kalibracji algorytmu, przyjęto próg wynoszący odpowiednio 40 oraz 80%. Pokazany na rys. 6.46 wykres przedstawia zużycie energii przez węzły sensorowe w przypadku stałego prawdopodobieństwa transmisji danych. Z kolei rys. 6.47 przedstawia bardziej realistyczny przypadek zmiennego w czasie prawdopodobieństwa transmisji danych. Jak można zaobserwować, pomimo relatywnie nieskomplikowanych założeń algorytmu uwzględnia on informację o pozostałej do wykorzystania energii. Niestety ogranicza się ona tylko do energii, którą może wykorzystać węzeł nadrzędny. Analizie nie podlega poziom energii dostępnej w pozostałych węzłach. W przypadku stałego prawdopodobieństwa transmisji danych, czas życia sieci wyniósł 50 godzin i 11 minut. W porównaniu do sytuacji, gdzie wszystkie węzły posiadały w pełni naładowane baterie, czas życia został skrócony o 14%. We wspomnianym przypadku, w węzłach do wykorzystania pozostało odpowiednio 105 i 131 mWh energii. W bardziej realistycznym scenariuszu, a więc przy zmiennym prawdopodobieństwie transmisji, czas życia zmniejszył się do 42 godzin i 27 minut,

pozostawiając poszczególnym węzłom 522 oraz 444 mWh energii do wykorzystania. W sytuacji, gdy baterie w węzłach są w pełni naładowane, wówczas czas życia sieci wydłuży się o 10%.



Rys. 6.46: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody EDCR (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)

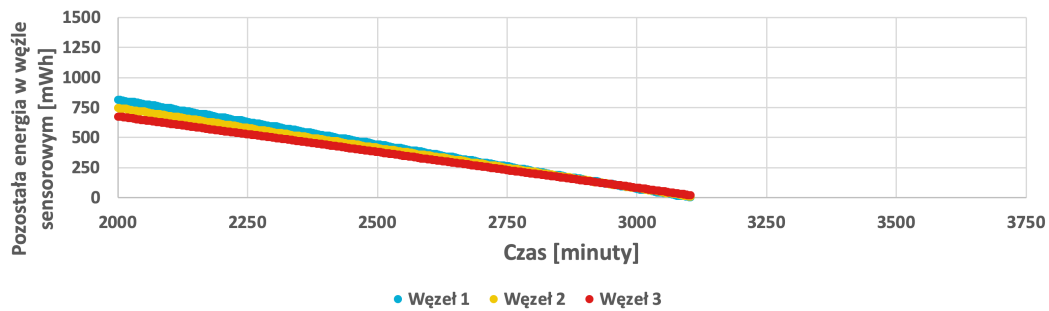


Rys. 6.47: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody EDCR (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

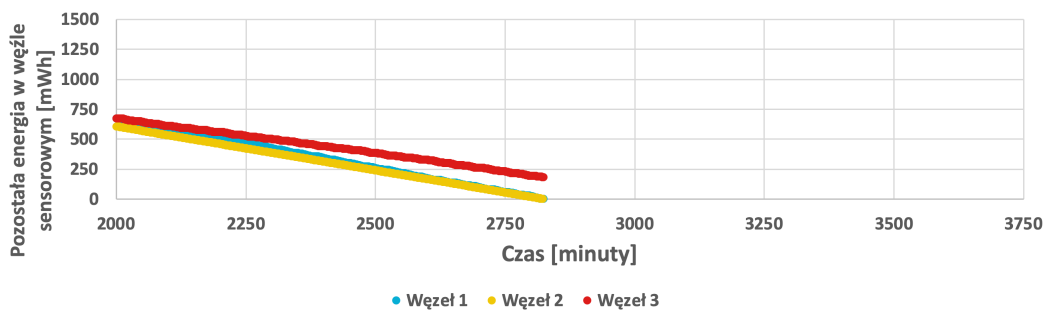
Czasy życia sieci w przypadku wykorzystania zaproponowanego podejścia zostały przedstawione na rys. 6.48 oraz 6.49. Z uwagi na fakt, że w proponowanych algorytmach dokonuje się rejestracji napływających do węzła nadrzędnego danych, możliwe staje się pośrednie oszacowanie poboru energii przez pozostałe węzły. Na podstawie wspomnianych wcześniej danych przewiduje się potrzebę ewentualnego przekazania roli węzła nadrzędnego. Najważniejszym zadaniem algorytmu jest wyznaczenie wartości parametru  $TCH_i$ , który określa czas przez który węzeł powinien wykonywać zadania węzła nadrzędnego. Warty uwagi jest to, że parametr  $TCH_i$  jest wyznaczony nie tylko na podstawie liczby zarejestrowanych transmisji, lecz także na podstawie początkowego poziomu naładowania baterii  $EI_i$ , czego nie uwzględniono w przypadku pozostałych badanych algorytmów. Takie podejście gwarantuje o wiele lepsze wykorzystanie dostępnej w węzłach energii, dla różnych prawdopodobieństw transmisji realizowanych przez węzły sieci. W przypadku stałego prawdopodobieństwa przesyłania danych, na podstawie pozostałej w węzłach energii (8 i 17 mWh), można wywnioskować, że czas życia sieci jest bliski maksimum i wynosi 51 godzin i 44 minuty. Do podobnego wniosku można dojść podczas analizy scenariusza o zmiennym prawdopodobieństwie transmisji danych, gdzie dwa węzły niemal w tym samym czasie całkowicie rozładowały swoją baterię (2 i 181 mWh pozostałej energii do wykorzystania w węzłach sensorowych). Na podstawie powyższych obserwacji można wywnioskować, że



opracowana metoda pozwala uzyskać dobre rezultaty nie tylko w scenariuszach o stałym jak i zmiennym prawdopodobieństwie transmisji danych, ale także w sytuacji występowania różnic początkowego stopnia naładowania baterii w poszczególnych węzłach sensorowych.



Rys. 6.48: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla proponowanej metody PDCR oraz czasu  $LT_O$  (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)

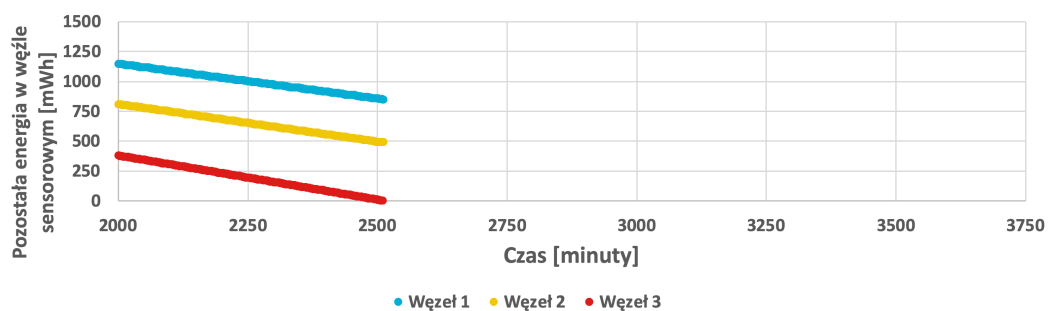


Rys. 6.49: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla proponowanej metody PDCR oraz czasu  $LT_O$  (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

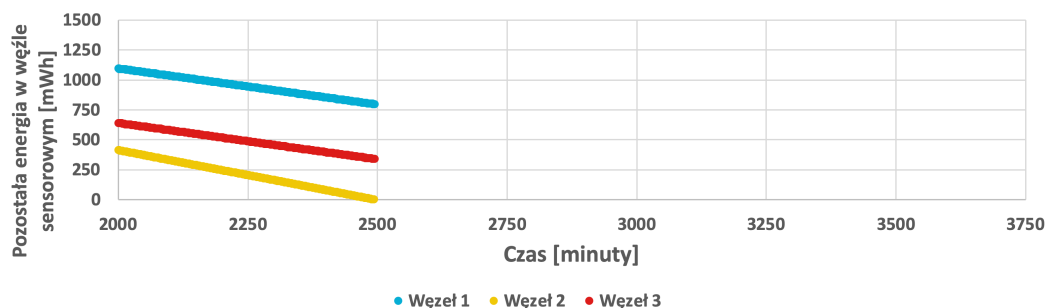
Uproszczona odmiana proponowanej metody przekazywania roli węzła nadrzędnego (FDCR) nie wyznacza wartości parametru  $TCH_i$ . Z tego powodu algorytm nie pozwala na rozładowanie wszystkich baterii w tym samym czasie, a więc nie jest w stanie optymalnie wykorzystać zasoby energii zgromadzone w bateriach poszczególnych węzłów. Wyznaczenie wspomnianego parametru jest również niezbędne do tego, aby algorytm uwzględniał informacje o różnym stopniu naładowania baterii w węzłach sensorowych. Podobnie jak ma to miejsce w algorytmie EDCR, dla algorytmu FDCR należy wyznaczyć próg, po osiągnięciu którego rola węzła nadrzędnego zostanie zmieniona. Znalezienie odpowiedniej wartości progów nie jest zadaniem łatwym poza, tym wartość progowa musiałaby być adaptowana do zmieniających się prawdopodobieństw transmisji. W przypadku stałego prawdopodobieństwa algorytm FDCR odnotowuje taki sam czas życia sieci jak w przypadku podejścia LEACH (41 godzin i 51 minut) pozostawiając w węzłach 847 i 489 mWh dostępnej do wykorzystania energii, co zostało przedstawione na rys. 6.50. Jest to związane z naturą działania obu podejść, które nie uwzględniają różnic pomiędzy liczbą transmisji pochodzących od poszczególnych węzłów sensorowych. Analizując bardziej



realistyczny przypadek, gdzie liczba zrealizowanych transmisji danych jest zmienna w czasie, zarejestrowano czas życia sieci, który wyniósł 41 godzin i 34 minuty (795 i 338 mWh pozostałej energii do wykorzystania w węzłach), co przedstawia rys. 6.51. Czasy życia sieci w przypadku zaproponowanego podejścia, jak i porównywanych metod, zostały porównane w tabeli 6.4. Potwierdza ona, że opracowane algorytmy wydłużają czas życia w warunkach rzeczywistych, a więc w sytuacji niepełnego naładowania baterii, jak również w przypadku, gdy projektant sieci świadomie zastosuje baterie o różnych pojemnościach nominalnych. Przeprowadzone eksperymenty są szczególnie istotne z uwagi na ograniczenia wynikające z fizycznych oraz chemicznych procesów, które zachodzą podczas ładowania, co powoduje trudność w uzyskaniu takiego samego poziomu naładowania baterii we wszystkich węzłach. Tabela potwierdza również wyższość metod, które decydują o zmianie roli węzła nadrzędnego podejmują na podstawie dostępnej energii w węźle, nad metodami, w których rola węzła jest przekazywana po predefiniowanym czasie. Ponadto przedstawione wyniki potwierdzają wyższą skuteczność wydłużania czasu życia za pomocą zaproponowanych algorytmów w porównaniu do metod zaczerpniętych z literatury. W celu oceny istotności statystycznej uzyskanych wyników przeprowadzono test statystyczny Wilcoxona. Symbolem  $\uparrow$  oznaczono, że dany algorytm jest statystycznie lepszy od wszystkich badanych algorytmów.



Rys. 6.50: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody FDCR (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)



Rys. 6.51: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody FDCR (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

Tabela 6.4: Czas  $LT_O$  dla porównywanych metod (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej węzłów)

Prawdopodobieństwo transmisji danych	Metoda	Czas życia sieci
Stałe	Bez zmiany roli węzła	33h 6m
	LEACH	41h 51m
	EDCR	50h 11m
	Proponowana metoda	51h 44m ↑
	FDCR	41h 51m
Zmienne	Bez zmiany roli węzła	33h 6m
	LEACH	40h 47m
	EDCR	42h 27m
	Proponowana metoda	47h 4m ↑
	FDCR	41h 34m

## 6.4 Czas do rozładowania wszystkich węzłów

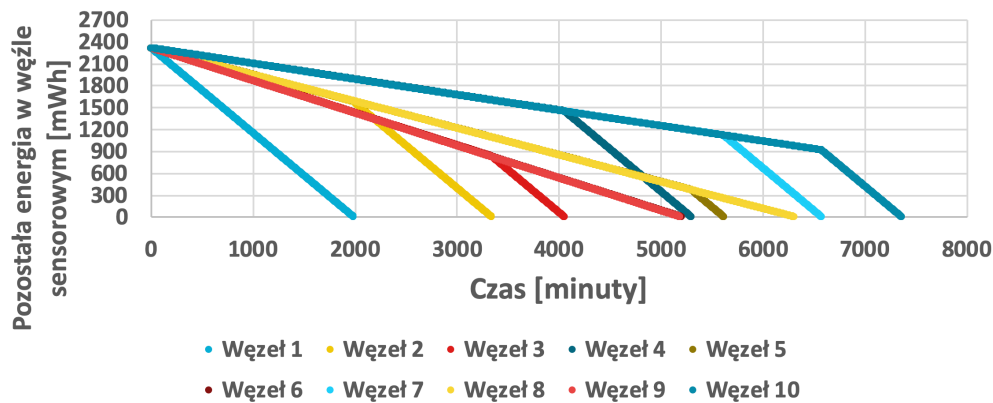
Sieci sensorowe znajdują zastosowanie również w przypadkach, gdy kluczowe jest jak najdłuższe utrzymanie działania przynajmniej jednego węzła. W takich sytuacjach zmiana ulega definicja czasu życia, która jest miarą świadcząca o wydajności sieci. Metoda wydłużania czasu życia sieci sensorowej do rozładowania wszystkich węzłów została zaproponowana w rozdziale 4.2. Niniejszy podrozdział zawiera wyniki eksperymentów, których celem było potwierdzenie słuszności przedstawionych wcześniej założeń teoretycznych. Na potrzeby eksperymentów przyjęto model sieci składającej się z 10 węzłów, bazujący na technologii LoRaWAN. Przeprowadzono eksperymenty uwzględniające stałe oraz zmienne prawdopodobieństwo transmisji. W przypadku zmiennego w czasie prawdopodobieństwa przesłania danych, zmiany następowały co 5 minut, w cyklach 15-minutowych. W drugim scenariuszu prawdopodobieństwo transmisji, nie ulegało zmianie przez cały czas trwania eksperymentu, co zostało przedstawione w tabeli 6.5. W obu przypadkach każdy z węzłów był wyposażony w pełni naładowaną baterię, o pojemności takiej samej jak w przypadku eksperymentów opisanych w rozdziale 6.3. W związku z powyższym, energia początkowa węzłów wynosiła 2310 mWh.

Rysunek 6.52 przedstawia wyniki uzyskane dla podstawowego podejścia, w którym węzłowi o najniższym identyfikatorze przypisuje się rolę węzła nadrzędnego, a po jego rozładowaniu jest ona sukcesywnie przekazywana do kolejnego aktywnego węzła, w kolejności rosnących identyfikatorów. W opisywanym przypadku czas życia sieci wyniósł 122 godziny i 39 minut. Rysunek 6.53 ilustruje sytuację zmiennego prawdopodobieństwa przesłania danych, dla którego czas życia uległ skróceniu do 96 godzin i 25 minut. Wadą zastosowanego podejścia jest fakt, że sposób nadania identyfikatorów poszczególnym węzłom sieci sensorowej ma decydujący wpływ na czas jeź życia. Czas życia sieci lawinowo spada, gdy w pierwszej kolejności zostaną rozładowane węzły, które wysyłają najmniej danych. Takie podejście ma istotne ograniczenia, ponieważ w praktyce trudno jest przewidzieć jaką liczbę transmisji będą realizowały poszczególne węzły oraz tak dobrać ich identyfikatory (określające kolejność w której pełnią rolę nadrzędną) aby

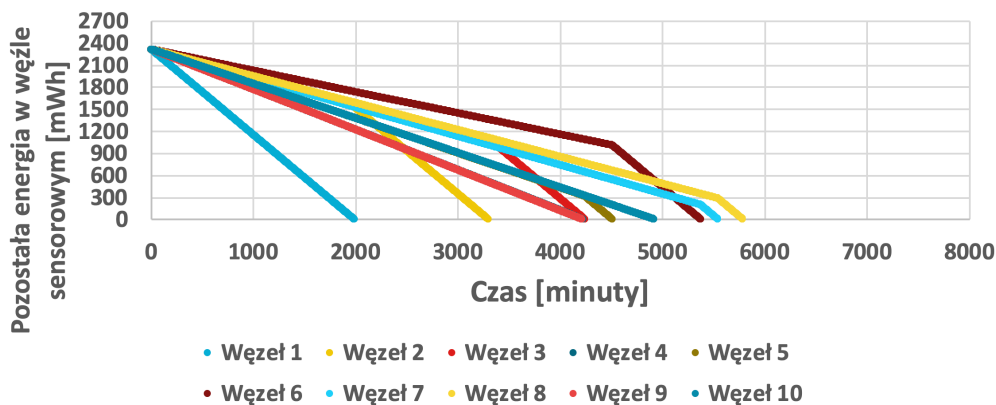
uzyskać długi czas życia sieci.

Identyfikator węzła sieci sensorowej	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Stałe prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia	10%	30%	40%	10%	30%	40%	10%	30%	40%	10%
	10%	30%	40%	10%	30%	40%	10%	30%	40%	10%
	10%	30%	40%	10%	30%	40%	10%	30%	40%	10%
Zmienne prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia zmieniające się w odstępach 5 minutowych	30%	30%	30%	40%	70%	30%	30%	30%	40%	70%
	10%	20%	20%	70%	10%	10%	20%	20%	70%	10%
	20%	50%	40%	50%	50%	20%	50%	40%	50%	50%

Tabela 6.5: Prawdopodobieństwa transmisji danych uwzględnione podczas wyznaczania czasu  $LT_A$

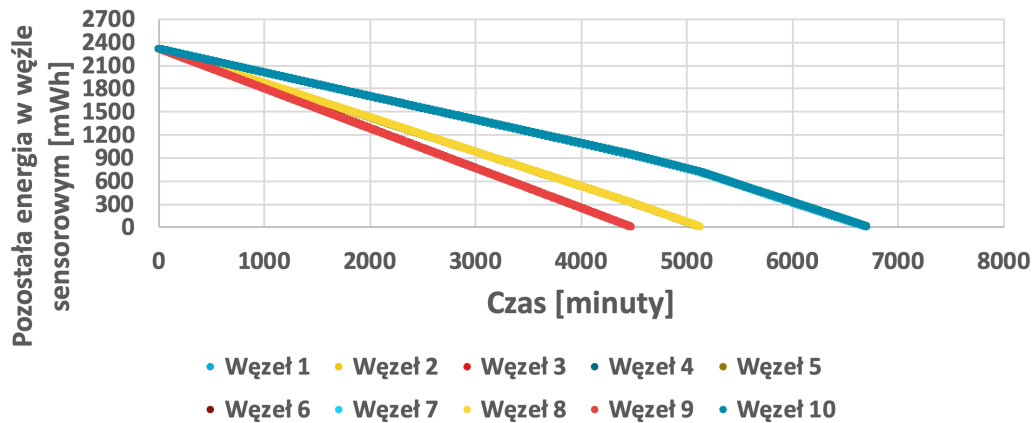


Rys. 6.52: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla podejścia podstawowego (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)

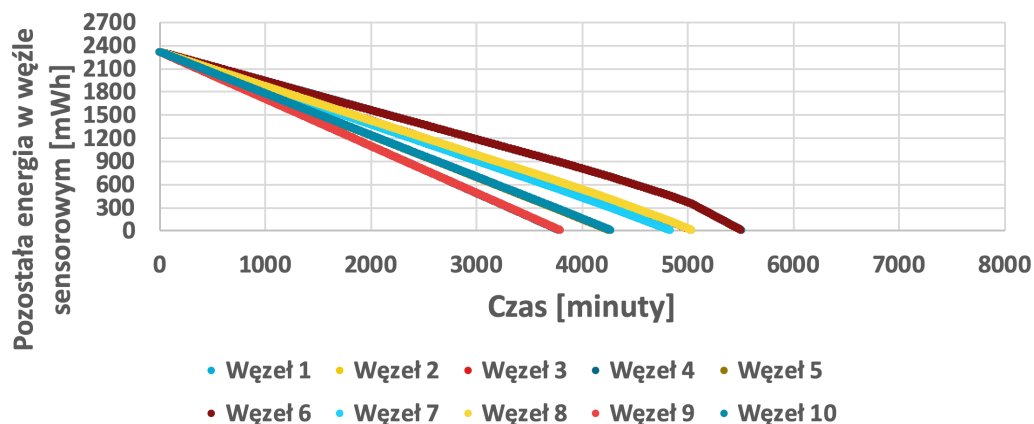


Rys. 6.53: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla podejścia podstawowego (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

Rysunek 6.54 oraz 6.55 przedstawia wyniki uzyskane podczas wykorzystania metody LEACH. W przypadku stałego prawdopodobieństwa przesyłania danych czas życia wyniósł 111 godzin i 43 minuty, w drugiej z kolei sytuacji czas uległ skróceniu do 91 godzin i 51 minut. Na podstawie przeprowadzonych badań można zaobserwować, że bez względu na definicję czasu życia sieci skuteczność w wydłużaniu czasu życia takiego podejścia jest relatywnie niska.



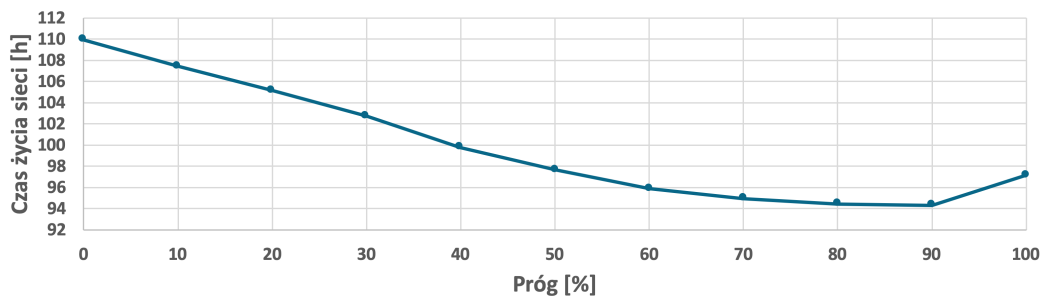
Rys. 6.54: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody LEACH (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)



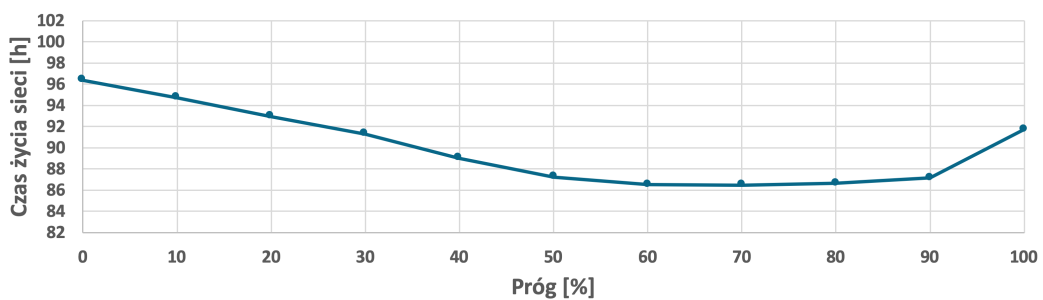
Rys. 6.55: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody LEACH (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

Kolejnym badanym podejściem był algorytm EDCR. Bazując na założeniach tego algorytmu w pierwszej kolejności należy określić próg, po którego osiągnięciu algorytm przekazuje rolę węzła nadrzędnego do kolejnego węzła. Zależność czasu życia sieci od wartości progu została przedstawiona na rys. 6.56 oraz 6.57. Po procesie kalibracji zarówno dla stałego jak i zmiennego prawdopodobieństwa transmisji zastosowano próg energetyczny równy 0%. Oznacza to, że przekazanie roli nadrzędnej następuje po całkowitym rozładowaniu węzła, co w praktyce sprowadza metodę do podstawowego podejścia, w którym sukcesywnie rozładowuje się węzły zgodnie z przypisanymi im na etapie projektowym identyfikatorami. Na podstawie rys. 6.58 oraz 6.59 można zaobserwować, że w przypadku stałego prawdopodobieństwa transmisji czas

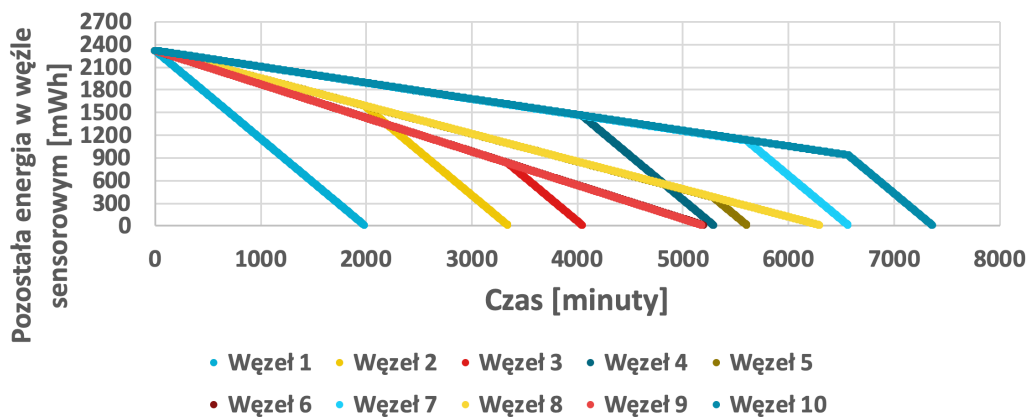
życia wyniósł 122 godziny i 45 minut, natomiast w przypadku okresowych zmian prawdopodobieństwa transmisji wspomniany czas wyniósł 96 godzin i 21 minut.



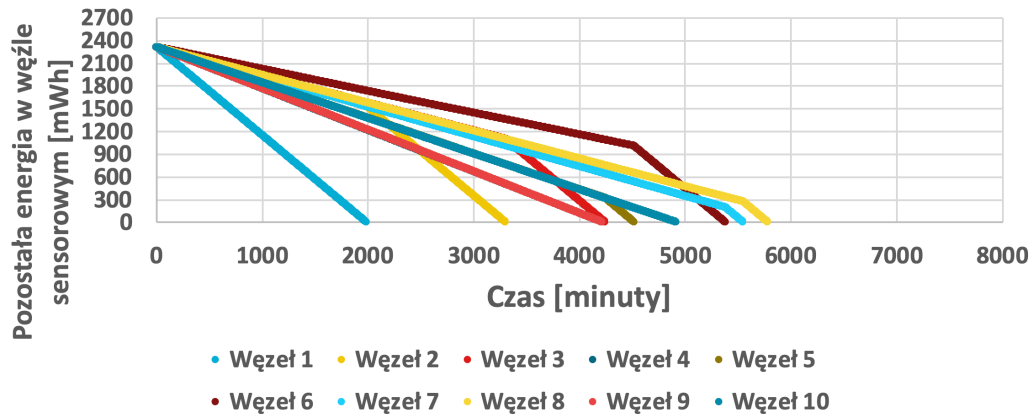
Rys. 6.56: Kalibracja algorytmu EDCR dla czasu  $LT_A$  (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)



Rys. 6.57: Kalibracja algorytmu EDCR dla czasu  $LT_A$  (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

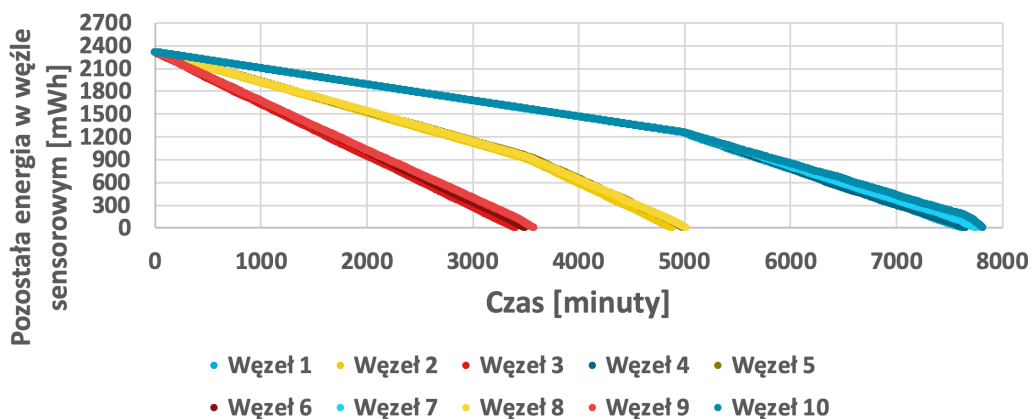


Rys. 6.58: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody EDCR (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)

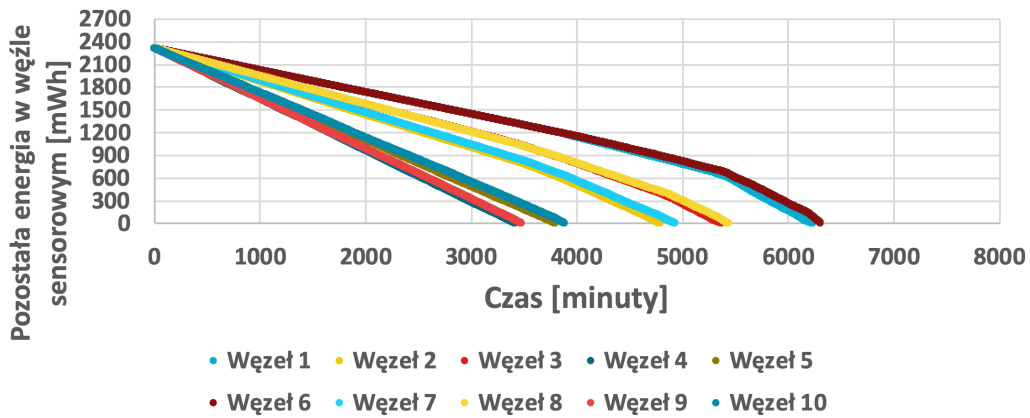


Rys. 6.59: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody EDCR (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

Wyniki uzyskane dla proponowanej metody zostały zaprezentowane na rys. 6.60 oraz 6.61. Dla przypadku, w którym prawdopodobieństwo transmisji jest stałe, czas życia sieci sensorowej został wydłużony do 130 godzin i 15 minut. Ponieważ proponowana metoda uwzględnia aktualne prawdopodobieństwa transmisji, wyznaczone w każdej rundzie, dużo szybciej następuje reakcja na zmiany wymagające wyboru nowego węzła nadrzędnego. W związku z powyższym, czas życia sieci w przypadku zmiennego prawdopodobieństwa transmisji danych uległ wydłużeniu i wyniósł 105 godzin i 7 minut.

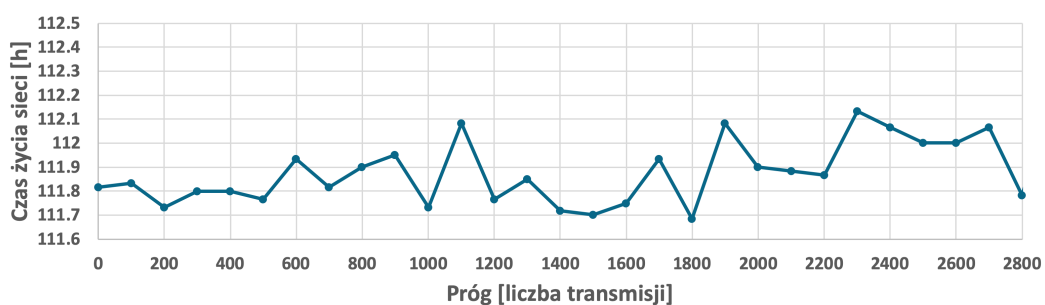


Rys. 6.60: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla proponowanej metody PDCR oraz czasu  $LT_A$  (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)



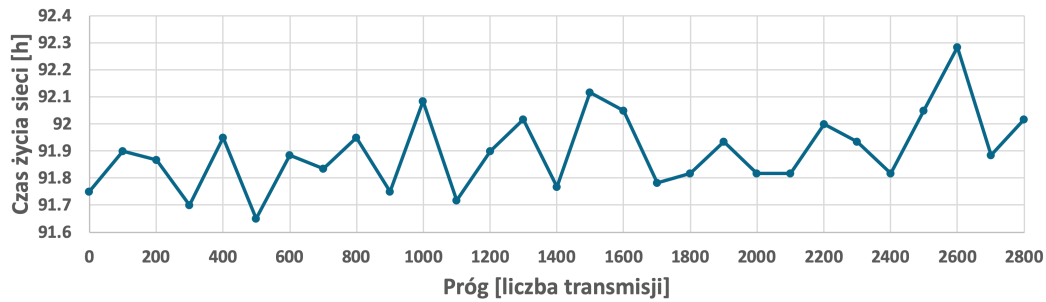
Rys. 6.61: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla proponowanej metody PDCR oraz czasu  $LT_A$  (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

Wyniki dla metody FDCR przedstawiono na rys. 6.64 oraz 6.65. Algorytm FDCR nie bierze pod uwagę źródła pochodzenia odbieranych transmisji, które mogłyby być wyznacznikiem do podjęcia decyzji przekazaniu roli węzła nadrzędnego. Podobnie jak ma to miejsce w przypadku algorytmu EDCR, przed sprawdzeniem skuteczności badanego podejścia należy przeprowadzić proces kalibracji. Na podstawie odpowiednich eksperymentów przyjęto wartości progu wynoszące 2300 oraz 2600 transmisji, co uzasadniają wyniki przedstawione na rys. 6.62 oraz 6.63. W sytuacji, gdy prawdopodobieństwo transmisji pozostaje stałe, algorytm FDCR osiąga lepsze wyniki w porównaniu z podejściem LEACH (112 godzin i 4 minuty). W ten sposób potwierdzono przewagę algorytmów uwzględniających dostępną energię w węźle nad rozwiązaniami, w których zmiana roli węzła następuje po określonym czasie. Po przeanalizowaniu bardziej realistycznego scenariusza, w którym prawdopodobieństwo przesyłania ramek zmienia się w czasie, czas życia sieci wyniósł 92 godziny i 21 minut. Ze względu na relatywnie krótki czas życia sieci, algorytm FDCR nie jest zalecany w praktycznym zastosowaniu.

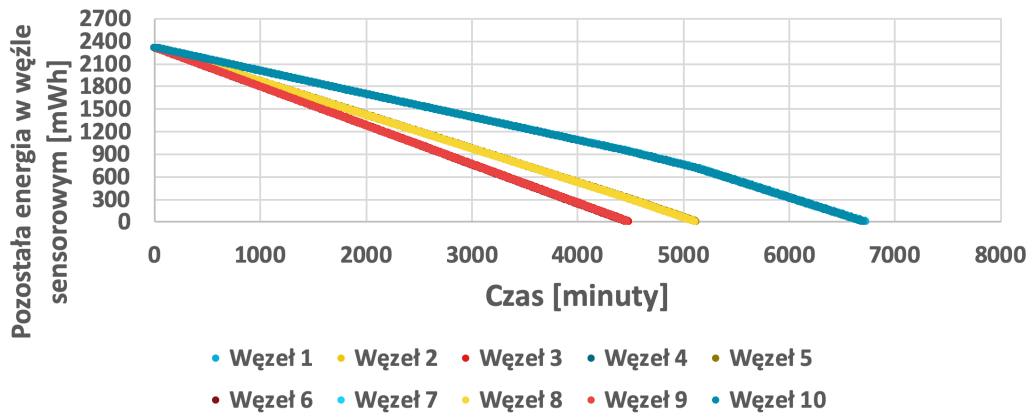


Rys. 6.62: Kalibracja algorytmu FDCR dla czasu  $LT_A$  (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)

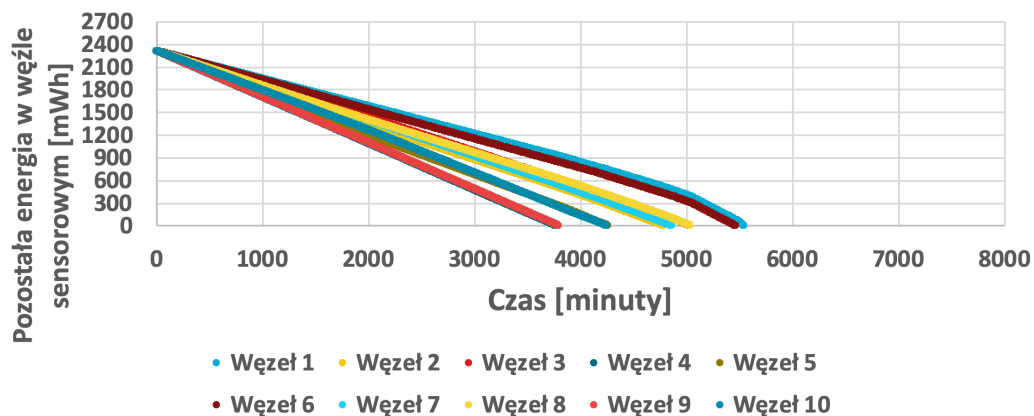




Rys. 6.63: Kalibracja algorytmu FDCR dla czasu  $LT_A$  (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)



Rys. 6.64: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody FDCR (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)



Rys. 6.65: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody FDCR (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

Tabela 6.6 przedstawia zbiorcze wyniki uzyskane zarówno dla proponowanego podejścia jak i innych dostępnych metod, przy założeniu jednakowego poziomu energii początkowej we wszystkich węzłach dla stałego jak i zmiennego prawdopodobieństwa transmisji danych. Symbolem  $\uparrow$  oznaczono, że dany algorytm jest statystycznie lepszy od wszystkich badanych algorytmów.



Tabela 6.6: Czas  $LT_A$  dla porównywanych metod (technologia LoRaWAN, jednakowe poziomy energii początkowej węzłów)

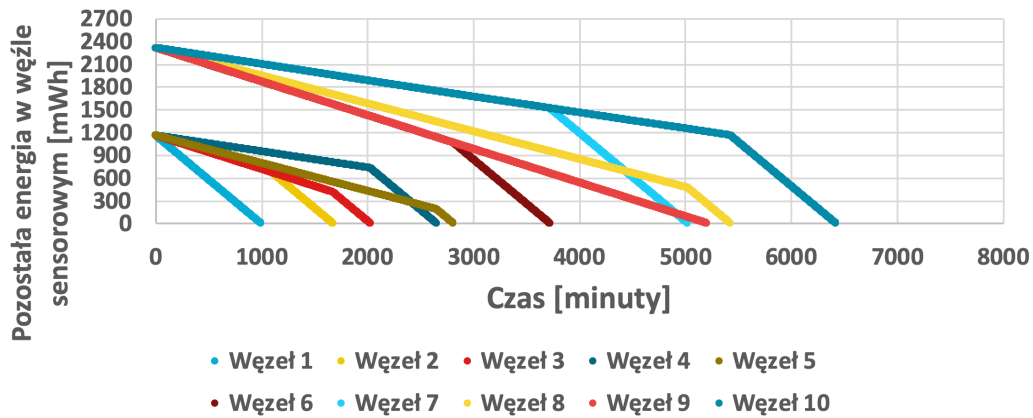
Prawdopodobieństwo transmisji danych	Metoda	Czas życia sieci
Stałe	Podejście podstawowe	122h 39
	LEACH	111h 43m
	EDCR	122h 45m
	Proponowana metoda	130h 15m ↑
	FDCR	112h 4m
Zmienne	Podejście podstawowe	96h 25m
	LEACH	91h 51m
	EDCR	96h 21m
	Proponowana metoda	105h 7m ↑
	FDCR	92h 21m

Ostatnim spośród przeprowadzonych eksperymentów jest weryfikacja skuteczności algorytmów w sytuacji, gdy tylko część węzłów posiada w pełni naładowaną baterię. Początkowa dostępna energia dla poszczególnych węzłów sensorowych została przedstawiona w tabeli 6.7, a prawdopodobieństwa transmisji danych uwzględnione podczas przeprowadzenia eksperymentów zawarto w tabeli 6.5.

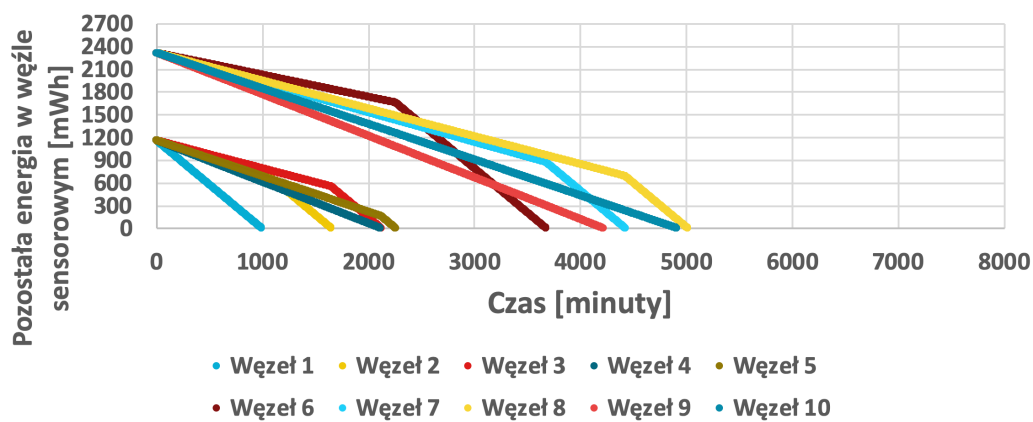
Identyfikator węzła sieci sensorowej	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Początkowa dostępna energia w węźle sensorowym [mWh]	1155	1155	1155	1155	2310	2310	2310	2310	2310	2310

Tabela 6.7: Założona podczas przeprowadzenia eksperymentów dostępna początkowa energia w węzłach sensorowych

Rys. 6.66 oraz 6.67 przedstawiają wyniki uzyskane dla podstawowego podejścia, w którym węzłowi o najniższym identyfikatorze przypisuje się rolę nadrzędną, a po jego rozładowaniu jest ona sukcesywnie przekazywana do kolejnego aktywnego węzła, w kolejności rosnących identyfikatorów. Rys. 6.66 przedstawia czas życia sieci, gdy prawdopodobieństwo transmisji jest stałe. Czas życia sieci wyniósł w tym przypadku wynosi 107 godzin. W sytuacji, gdy prawdopodobieństwo przesłania danych ulegało zmianom, odnotowano czas życia sieci na poziomie 83 godzin i 33 minut, co zostało przedstawione na rys. 6.67.

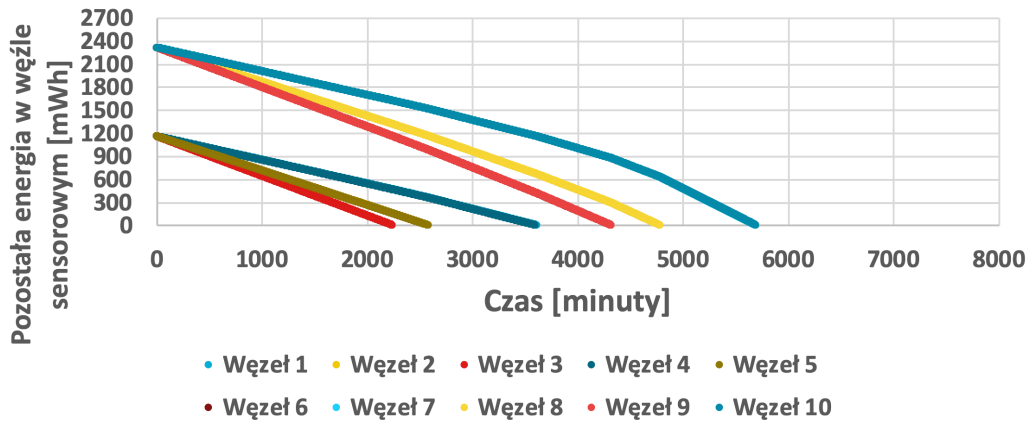


Rys. 6.66: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla podejścia podstawowego (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)

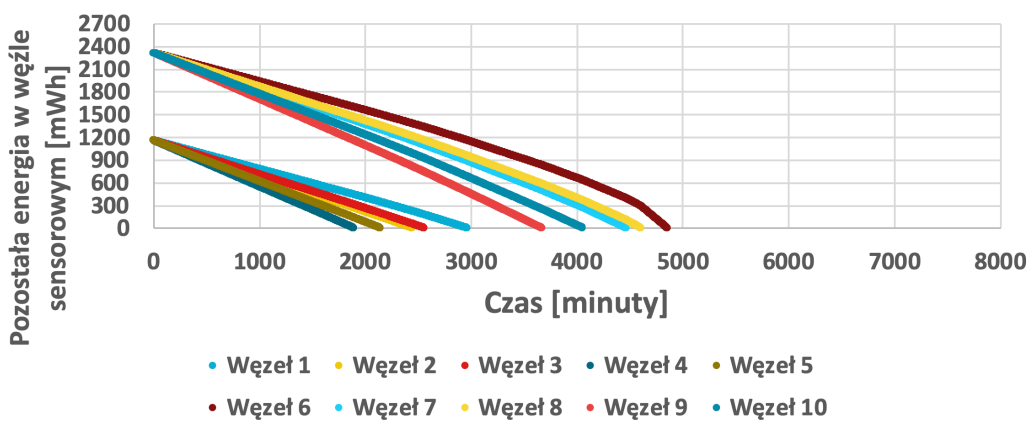


Rys. 6.67: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla podejścia podstawowego (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

Rys. 6.68 oraz 6.69 przedstawia wyniki uzyskane dla metody LEACH. W przypadku scenariusza, w którym prawdopodobieństwo transmisji danych nie ulegało zmianie, czas życia sieci wyniósł 94 godziny i 52 minuty. W przypadku zmiennego w czasie prawdopodobieństwa przesłania danych, czas życia sieci uległ skróceniu do 80 godzin 54 minut. Osiągnięte wyniki badań są związane z tym, że algorytm nie jest przystosowany do zastosowania w sieci, w której poszczególne węzły są wyposażone w baterie o różnych pojemnościach.

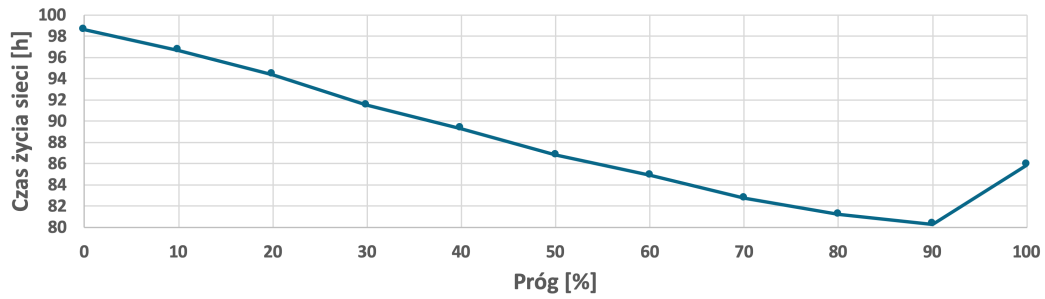


Rys. 6.68: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody LEACH (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)

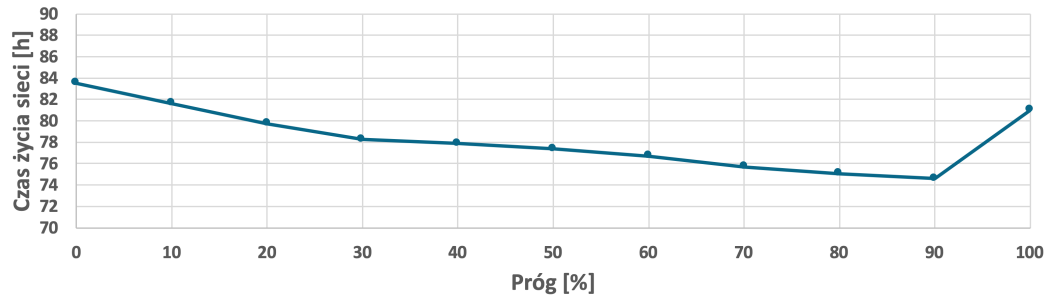


Rys. 6.69: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody LEACH (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

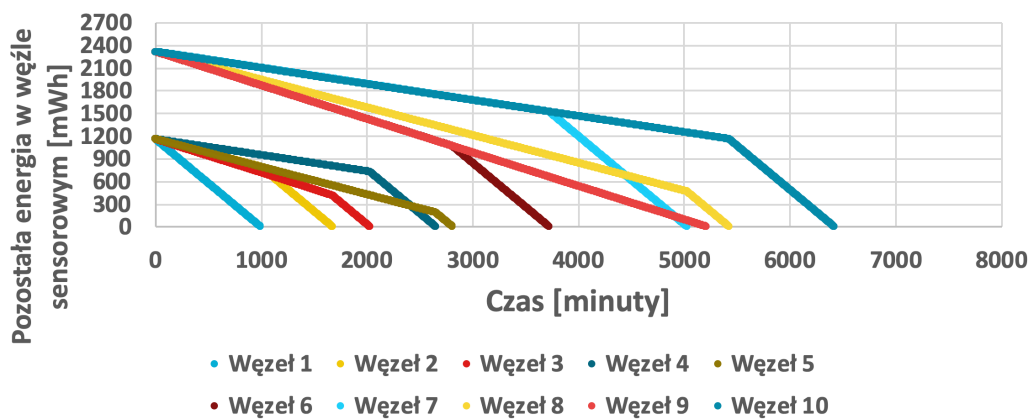
Wyniki wydłużania czasu  $LT_A$  dla algorytmu EDCR zostały przedstawione na rys. 6.72 oraz 6.73. Przed uruchomieniem sieci badane podejście wymaga przeprowadzenia procesu kalibracji, co zostało przedstawione na rys. 6.70 oraz 6.71. Na podstawie przedstawionych wyników można zaobserwować, że najdłuższy czas życia sieci osiągnięto dla progu wynoszącego 0%, a zatem zmiana węzła nadrzędnego powinna zostać zrealizowana po rozładowaniu węzła, który aktualnie pełni rolę nadrzędną. Implementacja algorytmu EDCR w przypadku wydłużania czasu  $LT_A$  powoduje, że nadanie identyfikatorów poszczególnym węzłom ma jeszcze większy wpływ na osiągnięte rezultaty. Jest to związane z faktem, że podczas konfigurowania ustawień sieci należy wziąć pod uwagę dwa parametry: liczbę transmisji zarejestrowanych przez dany węzeł oraz poziom naładowania baterii danego węzła. Jak przedstawiono na rys. 6.72 oraz rys. 6.73 czas życia sieci zbliżony jest do wyniku osiągniętego dla podejścia podstawowego i wynosi odpowiednio 106 godzin i 57 minut w przypadku stałego prawdopodobieństwa transmisji oraz 83 godziny i 28 minut w przypadku drugiego scenariusza.



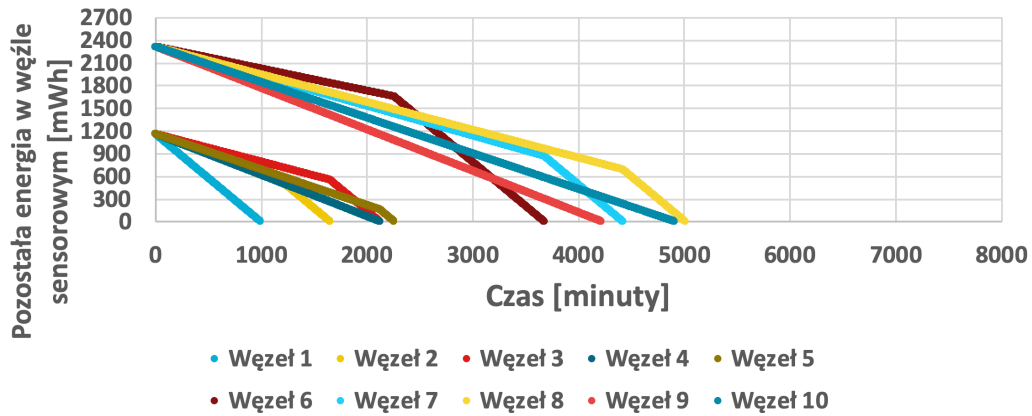
Rys. 6.70: Kalibracja algorytmu EDCR dla czasu  $LT_A$  (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)



Rys. 6.71: Kalibracja algorytmu EDCR dla czasu  $LT_A$  (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

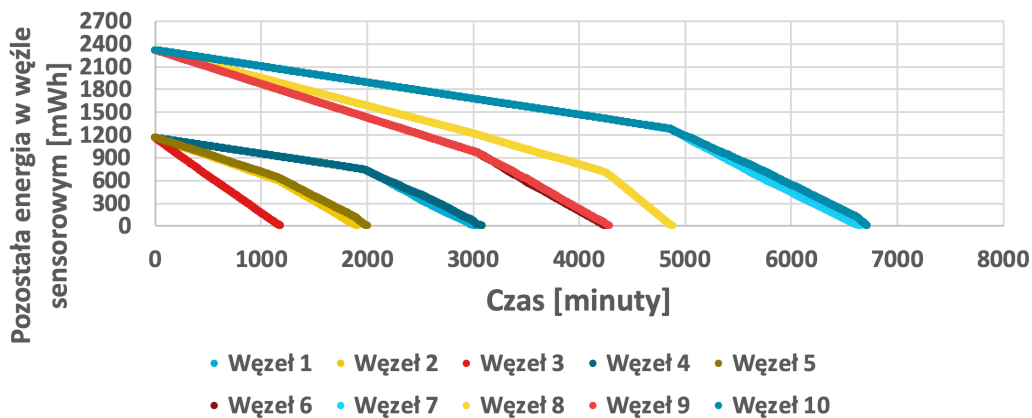


Rys. 6.72: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody EDCR (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)

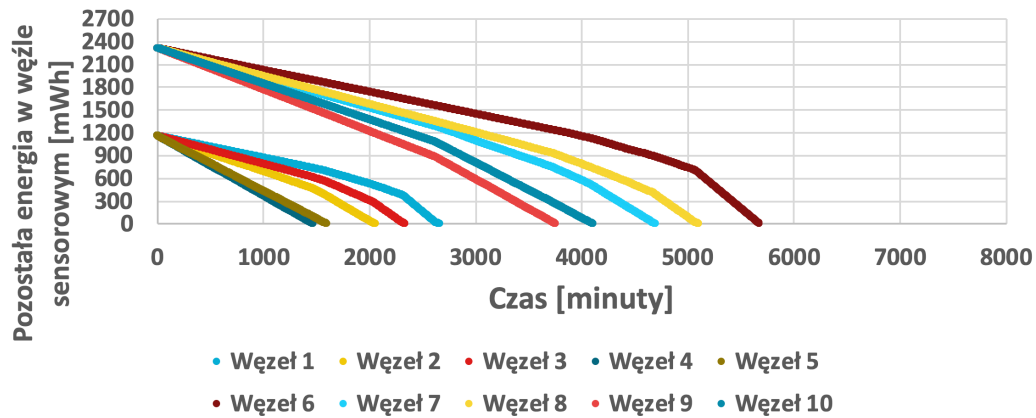


Rys. 6.73: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody EDCR (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

Wyniki, które uzyskano po zastosowaniu proponowanej metody zostały przedstawione na rys. 6.74 oraz 6.75. Z uwagi na fakt, że proponowane rozwiązanie uwzględnia początkowy stopień naładowania baterii, czas życia sieci jest skutecznie wydłużany. W przypadku scenariusza o stałym prawdopodobieństwie transmisji danych czas  $LT_A$  wyniósł 111 godzin i 57 minut. Warto zaznaczyć, że proponowane rozwiązanie uwzględnia sytuację, w której węzeł dokonuje przesłania danych w wybranych krokach pracy sieci. Dzięki temu, w przypadku, gdy prawdopodobieństwo przesłania danych ulega cyklicznej zmianie, czas życia sieci został wydłużony do 94 godzin i 33 minut.

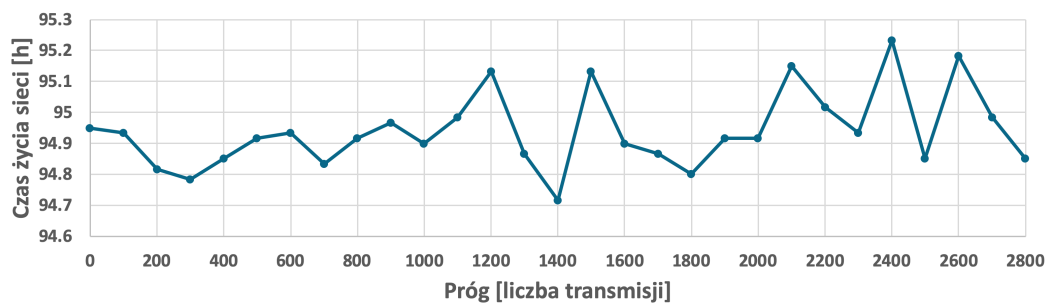


Rys. 6.74: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla proponowanej metody PDCR oraz czasu  $LT_A$  (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)

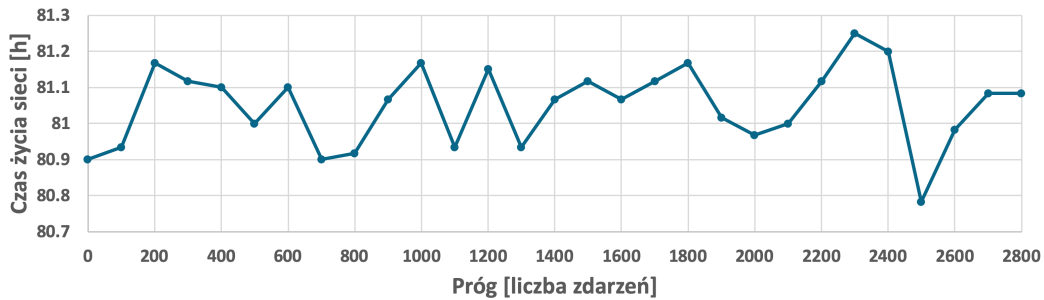


Rys. 6.75: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla proponowanej metody PDCR oraz czasu  $LT_A$  (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)

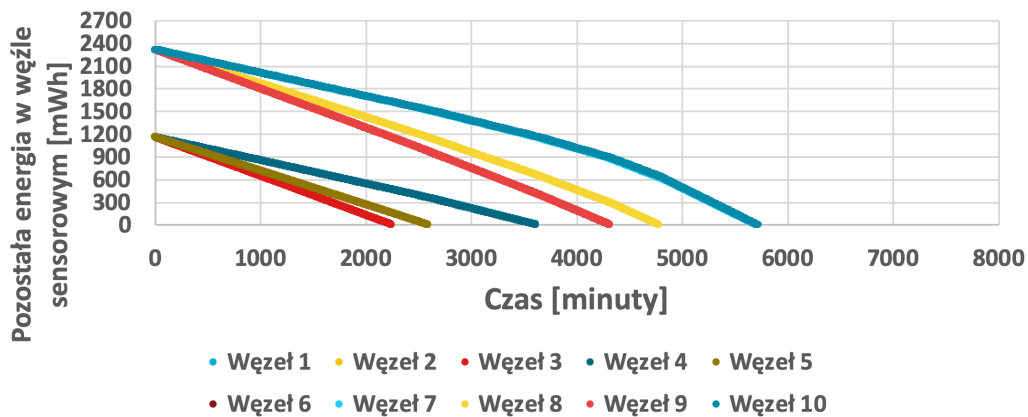
Rys. 6.76 oraz 6.77 przedstawia proces kalibracji przeprowadzony dla metody FDCR. W wyniku kalibracji, dla stałego prawdopodobieństwa transmisji zastosowano próg 2400 transmisji i osiągnięto czas życia sieci równy 95 godzin i 18 minut, co ilustruje rys. 6.78. W sytuacji, gdy prawdopodobieństwo przesłania danych zmieniało się w czasie wyznaczono próg równy 2300 transmisji, konsekwencją czego było osiągnięcie czasu życia sieci na poziomie 81 godzin i 15 minut. Szczegółowe wyniki przedstawiono na rys. 6.79. Ze względu na ograniczenia wynikające z zastosowanego algorytmu FDCR osiągnięte wyniki są zbliżone do rezultatów metody LE-ACH, która jest przedstawicielem strategii przekazywania roli węzła nadrzędnego wyzwalanych czasem.



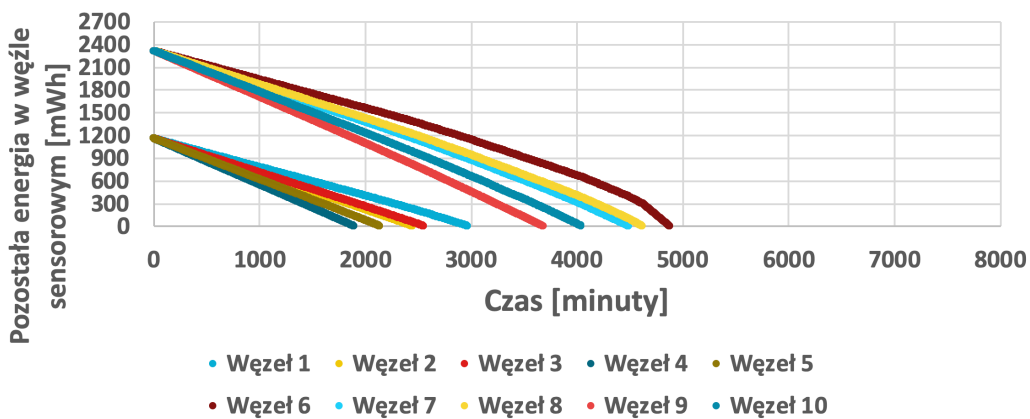
Rys. 6.76: Kalibracja algorytmu FDCR dla czasu  $LT_A$  (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)



Rys. 6.77: Kalibracja algorytmu FDCR dla czasu  $LT_A$  (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej, zmienne prawdopodobieństwo transmisji danych)



Rys. 6.78: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody FDCR (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)



Rys. 6.79: Zużycie energii przez węzły sensorowe dla metody FDCR (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej, stałe prawdopodobieństwo transmisji danych)

Tabela 6.8 przedstawia zbiorcze wyniki uzyskane zarówno dla proponowanego podejścia jak i innych dostępnych metod, przy założeniu różnego poziomu energii początkowej we wszystkich węzłach dla stałego jak i zmiennego prawdopodobieństwa transmisji danych. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów wykazano, że czas życia prototypowej sieci sensorowej ulega

znacznemu wydłużeniu przy zastosowaniu proponowanej metody w porównaniu z czasem życia uzyskiwanym w przypadku zastosowania innych dostępnych algorytmów. Dodatkowo, w celu wykazania istotności statystycznej prezentowanych wyników, przeprowadzony został test statystyczny Wilcoxon.

Tabela 6.8: Czas  $LT_A$  dla porównywanych metod (technologia LoRaWAN, różne poziomy energii początkowej węzłów)

Prawdopodobieństwo transmisji danych	Metoda	Czas życia sieci
Stałe	Podejście podstawowe	107h
	LEACH	94h 52m
	EDCR	106h 57m
	Proponowana metoda	111h 57m ↑
	FDCR	95h 18m
Zmienne	Podejście podstawowe	83h 33m
	LEACH	80h 54m
	EDCR	83h 28m
	Proponowana metoda	94h 33m ↑
	FDCR	81h 15m



## Rozdział 7

### Podsumowanie

Niniejsza rozprawa doktorska została poświęcona problemom wydłużania czasu życia bezprzewodowej sieci sensorowej poprzez odpowiedni wybór węzła nadrzędnego, który agreguje dane zebrane z węzłów sąsiednich i przesyła je do stacji bazowej. Rozpatrywane w pracy algorytmy transmisji bazują na założeniu, że węzły sensorowe mogą lokalnie przetwarzać odczyty czujników i decydować czy zarejestrowane dane powinny zostać przesłane do węzła nadrzędnego. W zależności od liczby wykonywanych transmisji, węzły sensorowe zużywają swoje zasoby energii w różnym tempie. W pracy wykazano, że uwzględniając prawdopodobieństwo transmisji danych oraz początkowy poziom naładowania baterii dla poszczególnych węzłów, możemy istotnie wydłużyć czas do rozładowania jednego węzła, jak również czas do rozładowania wszystkich węzłów w sieci. Proponowana metoda uwzględnia różne poziomy naładowania baterii oraz zmienne w czasie prawdopodobieństwa transmisji, co pozytywnie wpłynęło na wydłużenie czasu życia sieci sensorowej. Technologie transmisji danych wykorzystywane w bezprzewodowych sieciach sensorowych różnią się pod względem zapotrzebowania na energię, zasięgu, opóźnień oraz przepustowości łącza. Opracowane algorytmy uwzględniają parametry zastosowanej technologii transmisji, co pozwala na adaptację tych algorytmów odpowiednio do specyfiki danego systemu. Proponowane rozwiązanie zapewnia długi czas pracy sieci również w sytuacji, gdy poszczególne węzły dysponują różną ilością energii do wykorzystania.

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów wykazano, że czas życia prototypowej sieci sensorowej ulega znacznemu wydłużeniu przy zastosowaniu proponowanej metody, w porównaniu z czasem życia uzyskiwanym w przypadku zastosowania innych dostępnych algorytmów. Przeprowadzone badania obejmowały porównanie proponowanych metod zmiany roli węzła nadrzędnego ze znanymi w literaturze algorytmami uwzględniającymi czas oraz dostępną w węźle energię. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów wykazano, że w przypadku algorytmów, w których rola węzła nadrzędnego jest przekazywana po określonym czasie zasoby energii wykorzystywane są w sposób nieoptymalny. Wynika to z faktu, że rozpatrywane węzły sensorowe zużywają energię w różnym tempie. Na podstawie badań potwierdzono, że metody podejmujące decyzję o zmianie roli węzła nadrzędnego na podstawie poziomu dostępnej energii w węźle są bardziej efektywne niż te, w których rola węzła jest przekazywana po ustalonym czasie. Skuteczność proponowanych algorytmów została zweryfikowana z wykorzystaniem fizycznego modelu sieci sensorowej, co potwierdza możliwość ich praktycznej implementacji w węzłach sensorowych.

Dokonano oceny proponowanych algorytmów pod względem złożoności obliczeniowej. Wy-

---

soka złożoność obliczeniowa wynika z potrzeby rozwiązania układu równań liniowych o  $n$  zmiennych, gdzie  $n$  odpowiada liczbie węzłów. Wykazano, że wykorzystując odpowiednie metody numeryczne możemy istotnie skrócić czas wyznaczenia pierwiastków układu równań. Zastosowanie metod przybliżonych w tym kontekście nie spowodowało zauważalnego spadku czasu życia sieci.

Wynikiem zrealizowanej pracy są również propozycje dalszych kierunków badań nad algorytmami transmisji danych w bezprzewodowych sieciach sensorowych. Jednym z tych kierunków jest opracowanie metod uwzględniających węzły redundantne, które w sytuacji rozładowania baterii mogłyby przejąć zadania danego węzła. Innym kierunkiem jest uwzględnienie węzłów, które będą wyposażone w różne źródła energii oraz będą dysponowały możliwościami pozyskiwania energii z otoczenia. Ponadto, zaproponowane metody mogą być dalej rozwijane i udoskonalane m.in. poprzez wprowadzenie odpowiednich algorytmów do predykcji prawdopodobieństw transmisji z poszczególnych węzłów oraz mechanizmów obsługi bardziej złożonej hierarchii węzłów, z uwzględnieniem węzłów wyposażonych w różne zestawy czujników.

# Bibliografia

- [1] Preeti Yadav, Kaushal Kumar, and SC Sharma. Machine learning based techniques for node localization in wsn: A survey. In *2023 International Conference on Device Intelligence, Computing and Communication Technologies, (DICCT)*, pages 12–17. IEEE, 2023.
- [2] Ravi Sharma, Shiva Prakash, and Pankaj Roy. Methodology, applications, and challenges of wsn-iot. In *2020 international conference on electrical and electronics engineering (ICE3)*, pages 502–507. IEEE, 2020.
- [3] Taoufik Bouguera, Jean-François Diouris, Jean-Jacques Chaillout, Randa Jaouadi, and Guillaume Andrieux. Energy consumption model for sensor nodes based on lora and lorawan. *Sensors*, 18(7):2104, 2018.
- [4] Lluís Casals, Bernat Mir, Rafael Vidal, and Carles Gomez. Modeling the energy performance of lorawan. *Sensors*, 17(10):2364, 2017.
- [5] Jansen C Liando, Amalinda Gamage, Agustinus W Tengourtius, and Mo Li. Known and unknown facts of lora: Experiences from a large-scale measurement study. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 15(2):1–35, 2019.
- [6] G. J. Pottie and W. J. Kaiser. Wireless integrated network sensors. *Commun. ACM*, 43(5):51–58, may 2000.
- [7] Antonio Moschitta and Igor Neri. Power consumption assessment in wireless sensor networks. In Giorgos Fagas, Luca Gammaitoni, Douglas Paul, and Gabriel Abadal Berini, editors, *ICT - Energy - Concepts Towards Zero*, chapter 9. IntechOpen, Rijeka, 2014.
- [8] Nisit Pukrongta and Boonyarit Kumkhet. The relation of lorawan efficiency with energy consumption of sensor node. In *2019 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)*, pages 90–93, 2019.
- [9] Tatyana M Tatarnikova and Nikita S Mokretsov. Wireless sensor network clustering model. In *2023 XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*, pages 240–243. IEEE, 2023.
- [10] Hradesh Kumar and Pradeep Kumar Singh. Node energy based approach to improve network lifetime and throughput in wireless sensor networks. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, 2020.

- [11] Yu Xiuwu, Li Ying, Liu Yong, and Yu Hao. Wsn clustering routing algorithm based on hybrid genetic tabu search. *Wireless Personal Communications*, 124(4):3485–3506, 2022.
- [12] Sonam Lata, Shabana Mehfuz, Shabana Urooj, and Fadwa Alrowais. Fuzzy clustering algorithm for enhancing reliability and network lifetime of wireless sensor networks. *IEEE Access*, 8:66013–66024, 2020.
- [13] Miodrag Zivkovic, Nebojsa Bacanin, Eva Tuba, Ivana Strumberger, Timea Bezdán, and Milan Tuba. Wireless sensor networks life time optimization based on the improved firefly algorithm. In *2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, pages 1176–1181. IEEE, 2020.
- [14] Ikram Daanoune, Baghdad Abdennaceur, and Abdelhakim Ballouk. A comprehensive survey on leach-based clustering routing protocols in wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 114:102409, 2021.
- [15] Dionisis Kandris, Christos Nakas, Dimitrios Vomvas, and Grigorios Koulouras. Applications of wireless sensor networks: an up-to-date survey. *Applied system innovation*, 3(1):14, 2020.
- [16] Le Tian, Serena Santi, Amina Seferagić, Julong Lan, and Jeroen Famaey. Wi-fi halow for the internet of things: An up-to-date survey on iee 802.11 ah research. *Journal of Network and Computer Applications*, 182:103036, 2021.
- [17] Iynkaran Natgunanathan, Niroshinie Fernando, Seng W Loke, and Charitha Weerasuriya. Bluetooth low energy mesh: Applications, considerations and current state-of-the-art. *Sensors*, 23(4):1826, 2023.
- [18] Muhammad Ayoub Kamal, Muhammad Mansoor Alam, Aznida Abu Bakar Sajak, and Mazliham Mohd Su'ud. Requirements, deployments, and challenges of lora technology: A survey. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2023, 2023.
- [19] Xiaoyang Yin, Shengjian Jammy Chen, and Christophe Fumeaux. Wearable dual-band dual-polarization button antenna for wban applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 19(12):2240–2244, 2020.
- [20] Ying Chen, Ming Li, Pengpeng Chen, and Shixiong Xia. Survey of cross-technology communication for iot heterogeneous devices. *IET Communications*, 13(12):1709–1720, 2019.
- [21] Debashis De, Amartya Mukherjee, Santosh Kumar Das, and Nilanjan Dey. Wireless sensor network: Applications, challenges, and algorithms. *Nature inspired computing for wireless sensor networks*, pages 1–18, 2020.

- [22] Kingsley Eghonghon Ukhurebor, Ituabhor Odesanya, Silas Soo Tyokighir, Rout George Kerry, Akinola Samson Olayinka, and Ayodotun Oluwafemi Bobadoye. Wireless sensor networks: Applications and challenges. *Wireless Sensor Networks-Design, Deployment and Applications*, pages 1–6, 2021.
- [23] Atif Ali, Yasir Khan Jadoon, Sabir Ali Changazi, and Muhammad Qasim. Military operations: Wireless sensor networks based applications to reinforce future battlefield command system. In *2020 IEEE 23rd International Multitopic Conference (INMIC)*, pages 1–6. IEEE, 2020.
- [24] Ramgopal Kashyap. Applications of wireless sensor networks in healthcare. In *IoT and WSN applications for modern agricultural advancements: Emerging research and opportunities*, pages 8–40. IGI Global, 2020.
- [25] Fadi Al-Turjman and Joel Poncha Lemayian. Intelligence, security, and vehicular sensor networks in internet of things (iot)-enabled smart-cities: An overview. *Computers & Electrical Engineering*, 87:106776, 2020.
- [26] Alireza Abdollahi, Karim Rejeb, Abderahman Rejeb, Mohamed M Mostafa, and Suhaiza Zailani. Wireless sensor networks in agriculture: Insights from bibliometric analysis. *Sustainability*, 13(21):12011, 2021.
- [27] Shaleen Bhatnagar, Aman Gupta, GC Prashant, Purnendu Shekhar Pandey, Shri Ganesh V Manerkar, Madhu Kumar Vanteru, Kottala Sri Yogi, RSM Lakshmi Patibandla, et al. Efficient logistics solutions for e-commerce using wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2024.
- [28] HH Qasim, AE Hamza, HH Ibrahim, HA Saeed, and MI Hamzah. Design and implementation home security system and monitoring by using wireless sensor networks wsn/internet of things iot. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 10(3):2617–2624, 2020.
- [29] Devendra Prasad, Afshan Hassan, Deepak Kumar Verma, Pradeepta Sarangi, and Sunny Singh. Disaster management system using wireless sensor network: A review. In *2021 International Conference on Computational Intelligence and Computing Applications (IC-CICA)*, pages 1–6. IEEE, 2021.
- [30] Maryam Parsi and Mahmood Reza Akbarpour Jannat. Tsunami warning system using of iot. *Journal of Oceanography*, 11(44):1–17, 2021.
- [31] Chengpeng Yao, Yu Yang, Kun Yin, and Jinwei Yang. Traffic anomaly detection in wireless sensor networks based on principal component analysis and deep convolution neural network. *IEEE Access*, 10:103136–103149, 2022.

- [32] J Amutha, Sandeep Sharma, and Sanjay Kumar Sharma. Strategies based on various aspects of clustering in wireless sensor networks using classical, optimization and machine learning techniques: Review, taxonomy, research findings, challenges and future directions. *Computer Science Review*, 40:100376, 2021.
- [33] Amin Shahraki, Amir Taherkordi, Øystein Haugen, and Frank Eliassen. Clustering objectives in wireless sensor networks: A survey and research direction analysis. *Computer Networks*, 180:107376, 2020.
- [34] Salim El Khediri, Rehan Ullah Khan, Nejah Nasri, and Abdennaceur Kachouri. Mw-leach: Low energy adaptive clustering hierarchy approach for wsn. *IET Wireless Sensor Systems*, 10(3):126–129, 2020.
- [35] Ritesh Madan, Shuguang Cui, Sanjay Lall, and Andrea Goldsmith. Cross-layer design for lifetime maximization in interference-limited wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5(11):3142–3152, 2006.
- [36] Halil Yetgin, Kent Tsz Kan Cheung, Mohammed El-Hajjar, and Lajos Hanzo. Cross-layer network lifetime maximization in interference-limited wsns. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(8):3795–3803, 2014.
- [37] Christos G Cassandras, Tao Wang, and Sepideh Pourazarm. Optimal routing and energy allocation for lifetime maximization of wireless sensor networks with nonideal batteries. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 1(1):86–98, 2014.
- [38] Weiqiang Xu, Qingjiang Shi, Xiaoyun Wei, Zheng Ma, Xu Zhu, and Yaming Wang. Distributed optimal rate–reliability–lifetime tradeoff in time-varying wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 13(9):4836–4847, 2014.
- [39] Khoa T Phan, Rongfei Fan, Hai Jiang, Sergiy A Vorobyov, and Chintha Tellambura. Network lifetime maximization with node admission in wireless multimedia sensor networks. *IEEE Transactions on vehicular technology*, 58(7):3640–3646, 2009.
- [40] Hui Wang, Nazim Agoulmine, Maode Ma, and Yanliang Jin. Network lifetime optimization in wireless sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 28(7):1127–1137, 2010.
- [41] Hojoong Kwon, Tae Hyun Kim, Sunghyun Choi, and Byeong Gi Lee. A cross-layer strategy for energy-efficient reliable delivery in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5(12):3689–3699, 2006.
- [42] Lodewijk Van Hoesel, Tim Nieberg, Jian Wu, and Paul JM Havinga. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks by cross-layer interaction. *IEEE Wireless Communications*, 11(6):78–86, 2004.

- [43] Hithesh Nama, Mung Chiang, and Narayan Mandayam. Utility-lifetime trade-off in self-regulating wireless sensor networks: A cross-layer design approach. In *2006 IEEE International Conference on Communications*, volume 8, pages 3511–3516. IEEE, 2006.
- [44] S Arockiaraj, H Hebbar, and K Makkithaya. Mac layer protocol selection mechanism for the energy efficient cross layer protocol design of wireless sensor network. In *2021 International Conference in Advances in Power, Signal, and Information Technology (APSIT)*, pages 1–6. IEEE, 2021.
- [45] Haoyuan Pan and Soung Chang Liew. Information update: Tdma or fdma? *IEEE Wireless Communications Letters*, 9(6):856–860, 2020.
- [46] Thanh-Tung Nguyen, Taejoon Kim, and Taehong Kim. A distributed tdma scheduling algorithm using topological ordering for wireless sensor networks. *IEEE Access*, 8:145316–145331, 2020.
- [47] Walid Osamy, Ahmed A El-Sawy, and Ahmed M Khedr. Effective tdma scheduling for tree-based data collection using genetic algorithm in wireless sensor networks. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 13:796–815, 2020.
- [48] Chahrazed Benrebhoub and Lemia Louail. Dynamic tdma for wireless sensor networks. In *2021 30th wireless and optical communications conference (WOCC)*, pages 204–208. IEEE, 2021.
- [49] Poonam T Agarkar, Manish D Chawan, Pradeep T Karule, and Pratik R Hajare. A comprehensive survey on routing schemes and challenges in wireless sensor networks (wsn). *International Journal of Computer Networks and Applications (IJCNA)*, 7(6):193–207, 2020.
- [50] Ghanshyam Singh, Pallavi Joshi, and Ajay Singh Raghuvanshi. A novel duty cycle based cross layer model for energy efficient routing in iwsn based iot application. *KSIIT Transactions on Internet & Information Systems*, 16(6), 2022.
- [51] Kofi Sarpong Adu-Manu, Felicia Engmann, Godwin Sarfo-Kantanka, Godwill Enchill Baiden, and Bernice Akusika Dulemordzi. Wsn protocols and security challenges for environmental monitoring applications: A survey. *Journal of Sensors*, 2022, 2022.
- [52] Xi Chen, Jun Tang, and Songyang Lao. Review of unmanned aerial vehicle swarm communication architectures and routing protocols. *Applied Sciences*, 10(10):3661, 2020.
- [53] Saeed Salah, Raid Zaghal, and Mada Abdeljawad. A mathematical-based model for estimating the path duration of the dsdv routing protocol in manets. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 11(2):23, 2022.

- [54] Kedir Lemma Arega, Gameda Raga, and Roba Bareto. Survey on performance analysis of aodv, dsr and dsdv in manet. *Computer Engineering and Intelligent Systems*, 11(3):23–32, 2020.
- [55] Salem A Almazok and Bilgehan. A novel dynamic source routing (dsr) protocol based on minimum execution time scheduling and moth flame optimization (met-mfo). *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2020:1–26, 2020.
- [56] Bektı Maryuni Susanto, Agus Hariyanto, and Surateno Surateno. Performance comparison of proactive and reactive routing protocol in mobile ad hoc network. *Journal of Communications*, 13(5):218–224, 2018.
- [57] Kemal Bilen and İsmail Erdoğan. Effects of cooling on performance of photovoltaic/thermal (pv/t) solar panels: A comprehensive review. *Solar Energy*, 262:111829, 2023.
- [58] Satiye Korkmaz and İ Afşın Kariper. Pyroelectric nanogenerators (pyngs) in converting thermal energy into electrical energy: Fundamentals and current status. *Nano Energy*, 84:105888, 2021.
- [59] Huicong Liu, Hailing Fu, Lining Sun, Chengkuo Lee, and Eric M Yeatman. Hybrid energy harvesting technology: From materials, structural design, system integration to applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, 137:110473, 2021.
- [60] Jie Ren. Geometric thermoelectric pump: Energy harvesting beyond seebeck and pyroelectric effects. *Chinese Physics Letters*, 40(9):090501, 2023.
- [61] Hassan Elahi, Khushboo Munir, Marco Eugeni, Sofiane Atek, and Paolo Gaudenzi. Energy harvesting towards self-powered iot devices. *Energies*, 13(21):5528, 2020.
- [62] Jing Wang, Jiang-bo Wang, Zhong-yi Long, Tao Zhu, Zheng-sheng Li, Zhen-chuan Jiang, and Jie Liu. Design and application of a cooling device based on peltier effect coupled with electrohydrodynamics. *International Journal of Thermal Sciences*, 162:106761, 2021.
- [63] Faisal Karim Shaikh and Sherali Zeadally. Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55:1041–1054, 2016.
- [64] Michal Prauzek, Jaromir Konecny, Monika Borova, Karolina Janosova, Jakub Hlavica, and Petr Musilek. Energy harvesting sources, storage devices and system topologies for environmental wireless sensor networks: A review. *Sensors*, 18(8), 2018.
- [65] Ding Zhang, Heting Wu, Chris R Bowen, and Ya Yang. Recent advances in pyroelectric materials and applications. *Small*, 17(51):2103960, 2021.



- [66] Alexander J Williams, Matheus F Torquato, Ian M Cameron, Ashraf A Fahmy, and Johann Sienz. Survey of energy harvesting technologies for wireless sensor networks. *IEEE Access*, 9:77493–77510, 2021.
- [67] Wei Liu, Zhengqiang Wang, Shaohua Qu, and Rong Luo. Vibration energy harvesting and management for wireless sensor networks in bridge structural monitoring. In *2015 IEEE SENSORS*, pages 1–4. IEEE, 2015.
- [68] Junxiang Jiang, Shaogang Liu, Lifeng Feng, and Dan Zhao. A review of piezoelectric vibration energy harvesting with magnetic coupling based on different structural characteristics. *Micromachines*, 12(4):436, 2021.
- [69] Hongjun Zhu, Tao Tang, Huohai Yang, Junlei Wang, Jinze Song, and Geng Peng. The state-of-the-art brief review on piezoelectric energy harvesting from flow-induced vibration. *Shock and Vibration*, 2021:1–19, 2021.
- [70] Zhengbao Yang, Shengxi Zhou, Jean Zu, and Daniel Inman. High-performance piezoelectric energy harvesters and their applications. *Joule*, 2(4):642–697, 2018.
- [71] Khaled Mohamed, Hassan Elgamal, and Sallam A Kouritem. An experimental validation of a new shape optimization technique for piezoelectric harvesting cantilever beams. *Alexandria Engineering Journal*, 60(1):1751–1766, 2021.
- [72] Hao Wang, Abbas Jasim, and Xiaodan Chen. Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications—a comprehensive review. *Applied energy*, 212:1083–1094, 2018.
- [73] Michaël Peigney and Dominique Siegert. Low-frequency electromagnetic energy harvesting from highway bridge vibrations. *Journal of bridge engineering*, 25(8):04020056, 2020.
- [74] A Romero, Javier Cristóbal Cámara-Molina, Emma Moliner, Pedro Galvín, and María D Martínez-Rodrigo. Energy harvesting analysis in railway bridges: An approach based on modal decomposition. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 160:107848, 2021.
- [75] Yang Kuang, Zheng Jun Chew, John Dunville, Jim Sibson, and Meiling Zhu. Strongly coupled piezoelectric energy harvesters: Optimised design with over 100 mw power, high durability and robustness for self-powered condition monitoring. *Energy Conversion and Management*, 237:114129, 2021.
- [76] Mohammad Atmeh and Alwathiqbellah Ibrahim. Modeling of piezoelectric vibration energy harvesting from low-frequency using frequency up-conversion. In *Smart Materials, Adaptive Structures And Intelligent Systems*, volume 85499, page V001T04A011. American Society of Mechanical Engineers, 2021.

- [77] Yunjia Li, Kai Tao, Bobby George, and Zhichao Tan. Harvesting vibration energy: technologies and challenges. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 15(1):30–39, 2020.
- [78] Ioannis D Bougas, Maria S Papadopoulou, Achilles D Boursianis, Konstantinos Kokkinidis, and Sotirios K Goudos. State-of-the-art techniques in rf energy harvesting circuits. In *Telecom*, volume 2, pages 369–389. MDPI, 2021.
- [79] Hafiz Husnain Raza Sherazi, Dimitrios Zorbas, and Brendan O’Flynn. A comprehensive survey on rf energy harvesting: Applications and performance determinants. *Sensors*, 22(8):2990, 2022.
- [80] Ioannis D Bougas, Maria S Papadopoulou, Konstantinos Psannis, Panagiotis Sarigiannidis, and Sotirios K Goudos. State-of-the-art technologies in rf energy harvesting circuits—a review. In *2020 3rd World Symposium on Communication Engineering (WSCE)*, pages 18–22. IEEE, 2020.
- [81] Marco Grossi. Energy harvesting strategies for wireless sensor networks and mobile devices: A review. *Electronics*, 10(6):661, 2021.
- [82] Md Amanath Ullah, Rasool Keshavarz, Mehran Abolhasan, Justin Lipman, Karu P Esselle, and Negin Shariati. A review on antenna technologies for ambient rf energy harvesting and wireless power transfer: Designs, challenges and applications. *IEEE Access*, 10:17231–17267, 2022.
- [83] Achilles D Boursianis, Maria S Papadopoulou, Juliano Pierezan, Viviana C Mariani, Leandro S Coelho, Panagiotis Sarigiannidis, Stavros Koulouridis, and Sotirios K Goudos. Multiband patch antenna design using nature-inspired optimization method. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 2:151–162, 2020.
- [84] Xiaoqiang Gu, Simon Hemour, and Ke Wu. Far-field wireless power harvesting: Non-linear modeling, rectenna design, and emerging applications. *Proceedings of the IEEE*, 110(1):56–73, 2021.
- [85] Parham Ramezanpour and Mohammad-Reza Mosavi. Two-stage beamforming for rejecting interferences using deep neural networks. *IEEE Systems Journal*, 15(3):4439–4447, 2020.
- [86] Seung-Hwan Kim, Jae-Woo Kim, and Dong-Seong Kim. Energy consumption analysis of beamforming and cooperative schemes for aircraft wireless sensor networks. *Applied Sciences*, 10(12):4374, 2020.
- [87] Halil Yetgin, Kent Tsz Kan Cheung, Mohammed El-Hajjar, and Lajos Hanzo Hanzo. A survey of network lifetime maximization techniques in wireless sensor networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2):828–854, 2017.

- [88] Laxmikant Shevada, Hema D Raut, Rajeshwari Malekar, and Sumit Kumar. Comparative study of different beamforming techniques for 5g: A review. *Inventive Communication and Computational Technologies: Proceedings of ICICCT 2020*, pages 589–595, 2021.
- [89] Shangzhe Xu, Xiangchuan Wang, Yue Yang, Cong Ma, Xi Liu, Lihan Wang, Xin Jiang, Xingwei Ye, and Shilong Pan. Optical beamforming system based on polarization manipulation with amplitude–phase coupling suppression. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2022.
- [90] Ruoyu Zhang, Byonghyo Shim, and Wen Wu. Direction-of-arrival estimation for large antenna arrays with hybrid analog and digital architectures. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 70:72–88, 2021.
- [91] Javad Mirzaei, Shahram ShahbazPanahi, Foad Sohrabi, and Raviraj Adve. Hybrid analog and digital beamforming design for channel estimation in correlated massive mimo systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 69:5784–5800, 2021.
- [92] John Charles Gentile et al. *FPGA-Based Adaptive Digital Beamforming Using Machine Learning for MIMO Systems*. PhD thesis, Johns Hopkins University, 2021.
- [93] Nageswara Rao Dusari, Meenakshi Rawat, et al. Digital beamforming with digital pre-distortion using xilinx rf soc zcu216. In *2022 IEEE International Conference on Signal Processing and Communications (SPCOM)*, pages 1–5. IEEE, 2022.
- [94] Gul Sahar, Kamalrulnizam Bin Abu Bakar, Fatima Tul Zuhra, Sabit Rahim, Tehmina Bibi, and Syed Hamid Hussain Madni. Data redundancy reduction for energy-efficiency in wireless sensor networks: A comprehensive review. *IEEE Access*, 9:157859–157888, 2021.
- [95] Soroush Abbasian Dehkordi, Kamran Farajzadeh, Javad Rezazadeh, Reza Farahbakhsh, Kumbesan Sandrasegaran, and Masih Abbasian Dehkordi. A survey on data aggregation techniques in iot sensor networks. *Wireless Networks*, 26(2):1243–1263, 2020.
- [96] Paulo Jesus, Carlos Baquero, and Paulo Sérgio Almeida. A survey of distributed data aggregation algorithms. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(1):381–404, 2014.
- [97] Nitin Goyal, Mayank Dave, and Anil K Verma. Data aggregation in underwater wireless sensor network: Recent approaches and issues. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 31(3):275–286, 2019.
- [98] Maryam Naghibi and Hamid Barati. Shsda: secure hybrid structure data aggregation method in wireless sensor networks. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12(12):10769–10788, 2021.

- [99] Syed Rooh Ullah Jan, Rahim Khan, and Mian Ahmad Jan. An energy-efficient data aggregation approach for cluster-based wireless sensor networks. *Annals of telecommunications*, 76:321–329, 2021.
- [100] Xiaowu Liu, Jiguo Yu, Feng Li, Weifeng Lv, Yinglong Wang, and Xiuzhen Cheng. Data aggregation in wireless sensor networks: from the perspective of security. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(7):6495–6513, 2019.
- [101] Hanady M Abdulsalam, Bader A Ali, and Eman AlRoumi. Usage of mobile elements in internet of things environment for data aggregation in wireless sensor networks. *Computers & Electrical Engineering*, 72:789–807, 2018.
- [102] Shamim Yousefi, Hadis Karimipour, and Farnaz Derakhshan. Data aggregation mechanisms on the internet of things: a systematic literature review. *Internet of Things*, 15:100427, 2021.
- [103] Kalaivanan Karunanithy and Bhanumathi Velusamy. Cluster-tree based energy efficient data gathering protocol for industrial automation using wsns and iot. *Journal of Industrial Information Integration*, 19:100156, 2020.
- [104] Jong-Yong Lee, Kye-Dong Jung, Seok-Jae Moon, and Hwa-Young Jeong. Improvement on leach protocol of a wide-area wireless sensor network. *Multimedia Tools and Applications*, 76:19843–19860, 2017.
- [105] Beneyaz Ara Begum and Satyanarayana V Nandury. Component based self-healing approach for fault-tolerant data aggregation in wsn. *IEEE Access*, 10:73503–73520, 2022.
- [106] Bharat Bhushan and Gadadhar Sahoo. Requirements, protocols, and security challenges in wireless sensor networks: An industrial perspective. *Handbook of computer networks and cyber security: principles and paradigms*, pages 683–713, 2020.
- [107] Mohammed Salah Abood, Hua Wang, Hussain Falih Mahdi, Mustafa Maad Hamdi, and Ahmad S Abdullah. Review on secure data aggregation in wireless sensor networks. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 1076. IOP Publishing, 2021.
- [108] Ata Ullah, Muhammad Azeem, Humaira Ashraf, Abdullellah A Alaboudi, Mamoona Humayun, and Nadeem Z Jhanjhi. Secure healthcare data aggregation and transmission in iot—a survey. *IEEE Access*, 9:16849–16865, 2021.
- [109] Jeng-Wei Lin, Shih-wei Liao, and Fang-Yie Leu. Sensor data compression using bounded error piecewise linear approximation with resolution reduction. *Energies*, 12(13):2523, 2019.

- [110] Utkarsha S Pacharane and Rajiv Kumar Gupta. Clustering and compressive data gathering in wireless sensor network. *Wireless Personal Communications*, 109(2):1311–1331, 2019.
- [111] Jianlin Liu, Fenxiong Chen, and Dianhong Wang. Data compression based on stacked rbm-ae model for wireless sensor networks. *Sensors*, 18(12):4273, 2018.
- [112] Mu Xu, Junwen Zhang, Haipeng Zhang, Zhensheng Jia, and Luis Alberto Campos. Adaptive and efficient data compression technologies in 5g digital mobile fronthaul networks. In *Broadband Access Communication Technologies XIV*, volume 11307, pages 41–50. SPIE, 2020.
- [113] Keleadile Lucia Ketshabetswe, Adamu Murtala Zungeru, Bokani Mtengi, Caspar K Lebekwe, and SRS Prabakaran. Data compression algorithms for wireless sensor networks: A review and comparison. *IEEE Access*, 9:136872–136891, 2021.
- [114] Ali Kadhum M Al-Qurabat, Zahraa A Mohammed, and Zahraa Jabbar Hussein. Data traffic management based on compression and mdl techniques for smart agriculture in iot. *Wireless Personal Communications*, 120(3):2227–2258, 2021.
- [115] Suha Abdulhusein Abdulzahra, Ali Kadhum M Al-Qurabat, and Ali Kadhum Idrees. Compression-based data reduction technique for iot sensor networks. *Baghdad Science Journal*, 18(1):0184–0184, 2021.
- [116] Lithin Kumble and Kiran Kumari Patil. An improved data compression framework for wireless sensor networks using stacked convolutional autoencoder (s-cae). *SN Computer Science*, 4(4):419, 2023.
- [117] Uthayakumar Jayasankar, Vengattaraman Thirumal, and Dhavachelvan Ponnurangam. A survey on data compression techniques: From the perspective of data quality, coding schemes, data type and applications. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 33(2):119–140, 2021.
- [118] Ping Lou, Liang Shi, Xiaomei Zhang, Zheng Xiao, and Junwei Yan. A data-driven adaptive sampling method based on edge computing. *Sensors*, 20(8):2174, 2020.
- [119] Wenyu Cai and Meiyang Zhang. Spatiotemporal correlation-based adaptive sampling algorithm for clustered wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 14(8):1550147718794614, 2018.
- [120] Linh Nguyen, Nalika Ulapane, and Jaime Valls Miro. Adaptive sampling for spatial prediction in environmental monitoring using wireless sensor networks: A review. In *2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pages 346–351. IEEE, 2018.

- [121] Hamed Rezaie and Mona Ghassemian. An adaptive algorithm to improve energy efficiency in wearable activity recognition systems. *IEEE Sensors Journal*, 17(16):5315–5323, 2017.
- [122] Luca Mesin. A neural algorithm for the non-uniform and adaptive sampling of biomedical data. *Computers in Biology and Medicine*, 71:223–230, 2016.
- [123] Dimitrios Giouroukis, Alexander Dadiani, Jonas Traub, Steffen Zeuch, and Volker Markl. A survey of adaptive sampling and filtering algorithms for the internet of things. In *Proceedings of the 14th ACM International Conference on Distributed and Event-based Systems*, pages 27–38, 2020.
- [124] Montdher Alabadi, Adib Habbal, and Xian Wei. Industrial internet of things: Requirements, architecture, challenges, and future research directions. *IEEE Access*, 2022.
- [125] Yassine Ben-Aboud, Daniel Bonilla Licea, Mounir Ghogho, and Abdellatif Kobbane. On adaptive sampling algorithms for iot devices. In *ICC 2021-IEEE International Conference on Communications*, pages 1–7. IEEE, 2021.
- [126] Piumika N Karunanayake, Andreas Könsgen, Thushara Weerawardane, and Anna Förster. Q learning based adaptive protocol parameters for wsns. *Journal of Communications and Networks*, 25(1):76–87, 2022.
- [127] Tongxin Shu, Jiahong Chen, Vijay K Bhargava, and Clarence W de Silva. An energy-efficient dual prediction scheme using lms filter and lstm in wireless sensor networks for environment monitoring. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(4):6736–6747, 2019.
- [128] Pramod Ganjewar, Selvaraj Barani, and Sanjeev J Wagh. A hierarchical fractional lms prediction method for data reduction in a wireless sensor network. *Ad Hoc Networks*, 87:113–127, 2019.
- [129] Gabriel Martins Dias, Boris Bellalta, and Simon Oechsner. A survey about prediction-based data reduction in wireless sensor networks. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 49(3):1–35, 2016.
- [130] Miguel Diaz-Cacho, Andre Chaves, and Joaquin Lopez. Distance-based send-on-delta to test the accuracy of gnss receivers. In *2020 6th International Conference on Event-Based Control, Communication, and Signal Processing (EBCCS)*, pages 1–6. IEEE, 2020.
- [131] Seyed Amir Alavi, Kamyar Mehran, and Yang Hao. Optimal observer synthesis for microgrids with adaptive send-on-delta sampling over iot communication networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(11):11318–11327, 2020.
- [132] Miguel Diaz-Cacho, Emma Delgado, Antonio Barreiro, and Pablo Falcón. Basic send-on-delta sampling for signal tracking-error reduction. *Sensors*, 17(2):312, 2017.

- [133] Seyedali Mirjalili, Seyed Mohammad Mirjalili, and Andrew Lewis. Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, 69:46–61, 2014.
- [134] Zhendong Wang, Huamao Xie, Zhongdong Hu, Dahai Li, Junling Wang, and Wen Liang. Node coverage optimization algorithm for wireless sensor networks based on improved grey wolf optimizer. *Journal of Algorithms & Computational Technology*, 13:1748302619889498, 2019.
- [135] Wanguo Jiao, Rui Tang, and Yun Xu. A coverage optimization algorithm for the wireless sensor network with random deployment by using an improved flower pollination algorithm. *Forests*, 13(10):1690, 2022.
- [136] Xin-She Yang. Flower pollination algorithm for global optimization. In *International conference on unconventional computing and natural computation*, pages 240–249. Springer, 2012.
- [137] Ningning Qin and Jian Xu. An adaptive fish swarm-based mobile coverage in wsns. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018, 2018.
- [138] Dengxiu Yu, Hao Xu, CL Philip Chen, Wenjie Bai, and Zhen Wang. Dynamic coverage control based on k-means. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(5):5333–5341, 2021.
- [139] Mojtaba Ghasemi, Soleiman kadhoda Mohammadi, Mohsen Zare, Seyedali Mirjalili, Milad Gil, and Rasul Hemmati. A new firefly algorithm with improved global exploration and convergence with application to engineering optimization. *Decision Analytics Journal*, 5:100125, 2022.
- [140] Piyush Rawat and Siddhartha Chauhan. Clustering protocols in wireless sensor network: A survey, classification, issues, and future directions. *Computer Science Review*, 40:100396, 2021.
- [141] Pawan Singh Mehra. E-fuca: enhancement in fuzzy unequal clustering and routing for sustainable wireless sensor network. *Complex & Intelligent Systems*, 8(1):393–412, 2022.
- [142] Venkatesan Cherappa, Thamaraimanalan Thangarajan, Sivagama Sundari Meenakshi Sundaram, Fahima Hajjej, Arun Kumar Munusamy, and Ramalingam Shanmugam. Energy-efficient clustering and routing using asfo and a cross-layer-based expedient routing protocol for wireless sensor networks. *Sensors*, 23(5):2788, 2023.
- [143] Brady Lund and Jinxuan Ma. A review of cluster analysis techniques and their uses in library and information science research: k-means and k-medoids clustering. *Performance Measurement and Metrics*, 22(3):161–173, 2021.

- [144] Devershi Pallavi Bhatt, Yogesh Kumar Sharma, and Anand Sharma. Energy efficient wsn clustering using cuckoo search. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 1099, page 012048. IOP Publishing, 2021.
- [145] Yuqing Wu and Zhipu Wang. An improved cuckoo search algorithm for multiple odor sources localization. In *ICAART (2)*, pages 708–715, 2021.
- [146] Maribel Guerrero-Luis, Fevrier Valdez, and Oscar Castillo. A review on the cuckoo search algorithm. *Fuzzy Logic Hybrid Extensions of Neural and Optimization Algorithms: Theory and Applications*, pages 113–124, 2021.
- [147] Pratiksha Mishra, SK Alaria, and Prakash Dangi. Design and comparison of leach and improved centralized leach in wireless sensor network. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 9(5):34–39, 2021.
- [148] Desheng Liu, Chen Liang, Hongwei Mo, Xiaowei Chen, Dequan Kong, and Peng Chen. Leach-d: A low-energy, low-delay data transmission method for industrial internet of things wireless sensors. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 4:129–137, 2024.
- [149] Ainan Ihsan, Kashif Saghar, Tayyba Fatima, and Osman Hasan. Formal comparison of leach and its extensions. *Computer Standards & Interfaces*, 62:119–127, 2019.
- [150] Zaib Ullah. A survey on hybrid, energy efficient and distributed (heed) based energy efficient clustering protocols for wireless sensor networks. *Wireless personal communications*, 112(4):2685–2713, 2020.
- [151] Othmane Dergaoui, Youssef Baddi, and Abderrahim Hasbi. Introduce the ch role rotation mechanism in the multilayered deterministic wsn clustering to achieve long-term load balancing. In *International Conference on Signal Processing and Information Communications*, pages 41–49. Springer, 2023.
- [152] Nitin Mittal and Urvinder Singh. Distance-based residual energy-efficient stable election protocol for wsns. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40:1637–1646, 2015.
- [153] Paola G Vinueza Naranjo, Mohammad Shojafar, Habib Mostafaei, Zahra Pooranian, and Enzo Baccarelli. P-sep: A prolong stable election routing algorithm for energy-limited heterogeneous fog-supported wireless sensor networks. *The Journal of Supercomputing*, 73:733–755, 2017.
- [154] Samah E Kamel, Tamer F Ghanem, Khalid M Amin, and Hatem Abdelkader. Efficient energy management technique for wsns. In *2017 12th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)*, pages 122–126. IEEE, 2017.



- [155] Ahmad A Ababneh and Ebtessam Al-Zboun. Edac: A novel energy-aware clustering algorithm for wireless sensor networks. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 7(5), 2016.
- [156] Abdullah Said Alkalbani, Teddy Mantoro, and Satyanarayana Degala. Energy-distance aware clustering scheme (e-dacs) for wireless sensor networks. In *Recent Advances in Information and Communication Technology 2016: Proceedings of the 12th International Conference on Computing and Information Technology (IC2IT)*, pages 277–292. Springer, 2016.
- [157] Sankalpa Gamwarige and E Kulasekere. An algorithm for energy driven cluster head rotation in a distributed wireless sensor network. In *Proceedings of the international conference on information and automation*, pages 354–359. Colombo Sri Lanka, 2005.
- [158] Jiguo Yu, Yingying Qi, and Guanghui Wang. An energy-driven unequal clustering protocol for heterogeneous wireless sensor networks. *Journal of Control Theory and Applications*, 9(1):133–139, 2011.
- [159] Marcin Lewandowski and Bartłomiej Płaczek. An event-aware cluster-head rotation algorithm for extending lifetime of wireless sensor network with smart nodes. *Sensors*, 19(19):4060, 2019.
- [160] Ken Habgood and Itamar Arel. A condensation-based application of cramer’s rule for solving large-scale linear systems. *Journal of Discrete Algorithms*, 10:98–109, 2012.
- [161] Zhaolu Tian, Maoyi Tian, Zhongyun Liu, and Tongyang Xu. The jacobi and gauss–seidel-type iteration methods for the matrix equation  $axb=c$ . *Applied Mathematics and Computation*, 292:63–75, 2017.
- [162] Juan Pedro Milaszewicz. Improving jacobi and gauss-seidel iterations. *Linear Algebra and Its Applications*, 93:161–170, 1987.
- [163] Humaira Ali, Haque Nawaz, and Abdullah Maitlo. Performance analysis of heap sort and insertion sort algorithm. *International Journal*, 9(5), 2021.
- [164] Basma Emhamed Dihoum, Lutfia Almkhtar Abu Flijah, Siham Saleh Al-Qiblawi, and Somaya Ali Owen. Comparison of jacobi iteration method and gauss-seidel iteration method in solving fuzzy linear equation systems using a computer. *Journal of Algebraic Statistics*, 13(2):711–722, 2022.
- [165] Manideepa Saha and Jahnabi Chakravarty. Convergence of generalized sor, jacobi and gauss–seidel methods for linear systems. *International Journal of Applied and Computational Mathematics*, 6:1–12, 2020.

- [166] A Hadjidimos. Successive overrelaxation (sor) and related methods. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 123(1-2):177–199, 2000.
- [167] Honggang Zhang, Zhiyuan Liu, Jian Wang, and Yunchi Wu. A novel flow update policy in solving traffic assignment problems: Successive over relaxation iteration method. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 174:103111, 2023.
- [168] Mohamed Mohsen Ahmed. A comparison of sor, adi and multigrid methods for solving partial differential equations. *arXiv preprint arXiv:2208.02427*, 2022.
- [169] Mukarram AM Almuahaya, Waheb A Jabbar, Noorazliza Sulaiman, and Suliman Abdulmalek. A survey on lorawan technology: Recent trends, opportunities, simulation tools and future directions. *Electronics*, 11(1):164, 2022.
- [170] Cherechi Ndukwe, Tariq Iqbal, Xiaodong Liang, Jahangir Khan, and Lawrence Oriaghe Aghenta. Lora-based communication system for data transfer in microgrids. *AIMS Electronics and Electrical Engineering*, 4(3):303–325, 2020.
- [171] Nicoleta Cristina Gaitan. A long-distance communication architecture for medical devices based on lorawan protocol. *Electronics*, 10(8):940, 2021.
- [172] Gonçalo Vicente and Gonçalo Marques. Air quality monitoring through lora technologies: A literature review. In *2020 International Conference on Decision Aid Sciences and Application (DASA)*, pages 350–354. IEEE, 2020.
- [173] F Sánchez Sutil and Antonio Cano-Ortega. Smart public lighting control and measurement system using lora network. *Electronics*, 9(1):124, 2020.
- [174] SJ Suji Prasad, M Thangatamilan, M Suresh, Hitesh Panchal, Christofer Asir Rajan, C Sagana, B Gunapriya, Aditi Sharma, Tusharkumar Panchal, and Kishor Kumar Sadasivuni. An efficient lora-based smart agriculture management and monitoring system using wireless sensor networks. *International Journal of Ambient Energy*, 43(1):5447–5450, 2022.
- [175] R Madhumathi, T Arumuganathan, T Vimal, and S Vishnu. A lora based wireless smart irrigation system. In *2022 6th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology*, pages 514–517. IEEE, 2022.