

Jerzy Jagoda
Mariusz Hetmańczyk
Krzysztof Stankiewicz

60

ALGORYTM TRASOWANIA
SIECI SENSORCZNYCH
Z ZASTOSOWANIEM INTELIGENCJI ROJU

Prace Naukowe - Monografie



Gliwice 2025

<https://doi.org/10.32056/KOMAG/Monograph2025.6>

Jerzy Jagoda
Mariusz Hetmańczyk
Krzysztof Stankiewicz

**Algorytm trasowania sieci sensorycznych
z zastosowaniem inteligencji roju**



*Monografia opublikowana na licencji [Creative Commons Uznanie autorstwa -
- Użycie niekomercyjne 4.0 Międzynarodowe](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) (CC BY-NC 4.0)*

Autorzy:

dr inż. Jerzy Jagoda – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

dr inż. Mariusz Hetmańczyk, prof. PŚ – Politechnika Śląska

dr inż. Krzysztof Stankiewicz – ENECOR sp. z o.o. Gliwice

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Stanisław Legutko, dr h.c. prof. h.c. – Politechnika Poznańska

prof. dr hab. inż. Andrzej Tomporowski – Politechnika Bydgoska

dr hab. inż. Jarosław Konieczny, prof. AGH – Akademia Górniczo-Hutnicza
Kraków

Redaktorzy techniczni:

mgr Dorota Wierzbicka

mgr inż. Bogna Kolasińska

Copyright by *Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2025*

Wydawca

Instytut Techniki Górniczej KOMAG

ul. Pszczyńska 37, 44-101 Gliwice



Minister Nauki
i Szkolnictwa Wyższego



*„Publikacja finansowana ze środków budżetu państwa w ramach programu
Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą Wektory Nauki
nr projektu WNM/SN/0019/2025/01 kwota finansowania projektu 33 107,80 zł
całkowita wartość projektu 41 384,75 zł”*

ISBN 978-83-65593-52-8

Spis treści

	str.
Wykaz ważniejszych oznaczeń	
1. Wprowadzenie	1
2. Technologiczne podstawy procesu urabiania.....	3
2.1. Ogólna charakterystyka systemu ścianowego	3
2.2. Kombajn ścianowy – konstrukcja i rola w procesie urabiania	5
2.3. Przenośnik ścianowy (zgrzeblowy) – budowa i funkcjonowanie	6
2.4. Zmechanizowana obudowa ścianowa – budowa i eksploatacja	7
2.5. Sekcja obudowy zmechanizowanej – elementy konstrukcyjne i ich funkcje	8
2.6. Systemy monitorowania podporności i geometrii obudowy zmechanizowanej – przegląd	13
2.6.1. Systemy monitorowania ciśnienia w stojakach hydraulicznych	14
2.6.2. Systemy monitorowania geometrii sekcji obudowy zmechanizowanej	16
2.6.3. Wnioski z analizy dostępnych systemów monitorowania	18
2.7. Warunki pracy w podziemiach kopalń węgla kamiennego a wymagania stawiane urządzeniom	19
3. Algorytmy trasowania w bezprzewodowych sieciach sensorycznych	24
3.1. Wprowadzenie do algorytmów trasowania	24
3.2. Klasyczne podejścia do trasowania w sieciach sensorycznych.....	26
3.2.1. Podział algorytmów trasowania – poziomy i struktury	26
3.2.2. Protokoły proaktywne, reaktywne i hybrydowe	27
3.2.3. Hierarchiczne, lokacyjne i wielościeżkowe protokoły trasowania	29

3.2.4. Algorytmy metaheurystyczne w trasowaniu sieci sensorycznych	31
3.3. Testy symulacyjne algorytmów trasowania – przegląd wyników badań	32
3.3.1. Protokoły reaktywne i proaktywne – wyniki symulacji	33
3.3.2. Algorytm mrówkowy AntHocNet	35
3.3.3. Algorytmy PSO: SSKIR i MPSORP	37
3.3.4. Algorytmy pszczele – Beehive	40
3.3.5. Podsumowanie wyników badań symulacyjnych	41
4. Projekt algorytmu trasowania	44
4.1. Założenia projektowe i kryteria optymalizacji	44
4.1.1. Algorytm optymalizacji rojem cząstek	45
4.1.2. Algorytm mrówkowy	48
4.1.3. Algorytm pszczeli	50
4.1.4. Metoda realizacji badań	51
4.2. Koncepcja implementacji algorytmu w prototypie sieci sensorycznej	52
4.2.1. Implementacja	57
4.2.2. Metoda realizacji badań	60
5. Projekt i implementacja prototypowej sieci sensorycznej	62
5.1. Założenia funkcjonalne sieci sensorycznej	62
5.2. Architektura sprzętowa pojedynczego węzła sieci	63
5.3. Topologia sieci i rozmieszczenie węzłów	66
5.4. Środowisko uruchomieniowe i komunikacja zewnętrzna	67
5.4.1. Stanowisko do walidacji sieci 3-węzłowej	67
5.4.2. Stanowisko do walidacji sieci 30-węzłowej	68
5.4.3. Oprogramowanie na Raspberry Pi	70

5.5. Oprogramowanie węzłów i system G-MESH	72
5.5.1. Wybór platformy radiowej i środowisk IDE	72
5.5.2. Prototypowanie oprogramowania modułów nRF52 ...	78
5.5.3. Oprogramowanie G-MESH na komputerze klasy PC	79
5.6. Metodyka pomiarów parametrów sieci	82
5.6.1. Czas dotarcia pakietu do miejsca docelowego	82
5.6.2. Przepustowość sieci	83
5.6.3. Pewność dostarczenia danych do miejsca docelowego	83
5.6.4. Zużycie energii przez pojedynczy węzeł	84
5.7. Podsumowanie rozdziału	84
6. Badania eksperymentalne prototypowej sieci sensorycznej	85
6.1. Badania modelu sieci sensorycznej - struktura 3-węzłowa	85
6.2. Badania prototypu sieci sensorycznej - sieć z 30 węzłami	90
6.3. Analiza statystyczna parametrów sieci.....	100
7. Ocena możliwości wdrożenia węzłów sieci sensorycznej w wykonaniu ATEX	135
7.1. Analiza spełnienia wymagań dyrektywy ATEX przez obudowę węzłów sieci	135
7.2. Analiza spełnienia wymagań dyrektywy ATEX przez obwody elektryczne węzłów projektowanej sieci sensorycznej	142
8. Podsumowanie	150
Literatura	152
Streszczenie	162
Abstract	164

Wykaz ważniejszych oznaczeń

D	– wymiar przestrzeni, w której znajdują się cząstki (w rozpatrywanej implementacji równy liczbie węzłów w sieci sensorycznej); cząstka umieszczona jest w przestrzeni, której położenie określa odległość od każdego z węzłów sieci,
i	– numer porządkowy cząstki,
X_i	– położenie i -tej cząstki w D wymiarowej przestrzeni,
w	– parametr determinujący wpływ poprzedniego położenia cząstki na jej bieżącą pozycję,
V_i	– bieżąca prędkość i -tej cząstki,
c_1, c_2	– parametry skalujące,
r_1, r_2	– liczby losowe,
P_{best}	– najlepiej dopasowane do kryterium rozwiązanie lokalne,
G_{best}	– najlepiej dopasowane do kryterium rozwiązanie globalne,
t	– czas [s],
w_1, w_2, w_3	– wagi poszczególnych kryteriów (mieszczące się w przedziale $(0,1>)$),
RSSI	– moc sygnału nadajnika radiowego sąsiedniego węzła (ang. Received Signal Strength Indicator) [dBm],
HopToSink	– liczba skoków (przejsć pomiędzy węzłami typu NODE) do węzła typu SINK,
Pheromon	– parametr inkrementowany przy przejściu pakietu przez dany węzeł,
L_N	– liczba sąsiadów węzła w_j .
τ	– ilość feromonu pozostawionego w poszczególnych węzłach,
ϕ	– wartość lokalnej funkcji kryterium,
l	– liczba sąsiadów węzła j ,
α, β	– współczynniki pozwalające na dobranie wagi pomiędzy feromonem, a funkcją kryterium,
p_{ij}	– prawdopodobieństwo wyboru węzła j , przez mrówkę znajdującą się w węźle i ,
P	– prawdopodobieństwo wyboru ścieżki przekazanej przez pszczołę typu dancer,

L	– długość ścieżki przekazanej przez pszczołę typu dancer (liczba przejść przez węzły),
PDR	– współczynnik określający pewność dostarczenia danych do odbiorcy (ang. Packet Delivery Ratio),
$P_{receive}$	– liczba pakietów odebranych,
P_{send}	– liczba pakietów wysłanych.

1. Wprowadzenie

Współczesne górnictwo podziemne węgla kamiennego znajduje się w fazie intensywnej transformacji technologicznej, w której coraz większą rolę odgrywają systemy monitoringu, cyfryzacja procesów urabiania oraz zdalnie zarządzane układy diagnostyczne. Funkcjonowanie zakładów górniczych opiera się obecnie na ciągłym pozyskiwaniu, przetwarzaniu i analizowaniu danych, co stanowi zarówno podstawę utrzymania bezpieczeństwa prowadzenia robót, jak i kluczowy element optymalizacji eksploatacji złóż. Dynamiczny rozwój technologii cyfrowych sprawił, że górnictwo weszło w obszar rozwiązań charakterystycznych dla Industrial Internet of Things (IIoT) oraz koncepcji Przemysłu 5.0, w których rosnącą rolę odgrywają inteligentne urządzenia pomiarowe, rozproszone sieci sensoryczne oraz zaawansowane systemy decyzyjne. Liczba elementów wyposażonych w czujniki stale wzrasta, a ich funkcjonowanie w warunkach podziemnych wymaga zarówno wysokiej niezawodności, jak i odporności na specyficzne zagrożenia środowiskowe [24, 26, 70].

Równolegle do rozwoju technologii rośnie znaczenie szybkiego i precyzyjnego monitorowania procesów eksploatacyjnych. Przepisy prawa geologicznego i górniczego nakładają na przedsiębiorców obowiązek bieżącej kontroli parametrów technicznych, środowiskowych oraz organizacyjnych, co obejmuje m.in. rejestrację warunków pracy urządzeń, nadzór nad przebiegiem procesów technologicznych oraz wykrywanie stanów niebezpiecznych. Informacje te stanowią podstawę zapewnienia bezpieczeństwa pracowników i zapobiegania zagrożeniom naturalnym, takim jak obwały czy zawały skał [24, 26, 70].

W strukturze współczesnych kopalń czujniki stanowią kluczowe źródło danych diagnostycznych dotyczących stanu maszyn, obudowy zmechanizowanej oraz środowiska pracy. Dane te są przesyłane do central dyspozytorskich, gdzie poddaje się je analizie i interpretacji, co pozwala na szybką reakcję w przypadku wykrycia odchyleń od normy, ograniczenie czasu przestojów oraz sprawniejsze planowanie działań serwisowych. Jest to szczególnie istotne w eksploatacji głębokich pokładów o złożonej budowie geologicznej, gdzie rośnie zarówno ryzyko awarii, jak i intensywność zagrożeń naturalnych [15, 69, 70].

Wraz z rozwojem infrastruktury pomiarowej zwiększają się wymagania stawiane sieciom transmisji danych. Niezawodność tych systemów ma kluczowe znaczenie, ponieważ nawet krótkotrwała utrata łączności może utrudnić kontrolę

parametrów bezpieczeństwa, a w skrajnych przypadkach uniemożliwić podejmowanie decyzji operacyjnych. W górnictwie szczególnego znaczenia nabiera także elastyczność konfiguracji sieci, umożliwiającą szybkie dostosowanie jej do zmian wynikających z postępu ścian, relokacji urządzeń czy zmiany warunków eksploatacyjnych [2, 22, 25, 27, 31, 61].

Jeszcze bardziej złożone są wymagania dotyczące bezpieczeństwa eksploatacyjnego infrastruktury pomiarowej. Zdecydowana większość czujników i modułów komunikacyjnych pracujących w strefach zagrożonych wybuchem musi spełniać wymagania norm zharmonizowanych oraz dyrektywy Parlamentu i Rady (ATEX) [77, 78, 81], określającej zasady stosowania urządzeń elektrycznych w atmosferach metanowych i pyłowych. Wprowadzenie zabezpieczeń przeciwwybuchowych wiąże się jednak z ograniczeniami konstrukcyjnymi i energetycznymi, które szczególnie dotyczą urządzeń bateryjnych. Jednym z najważniejszych wyzwań pozostaje więc minimalizacja zużycia energii przy zachowaniu pełnej funkcjonalności i stabilności pracy układów sensorycznych [16, 40, 77, 78, 81].

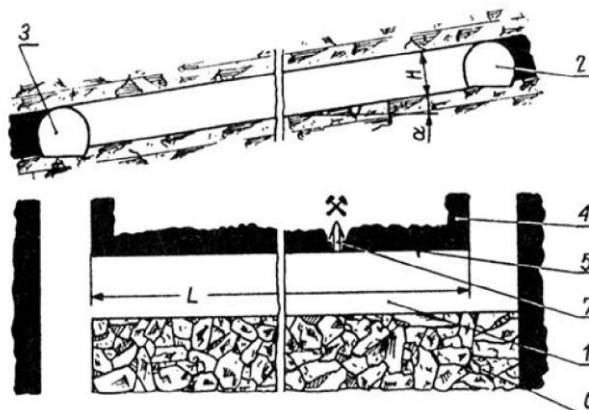
W rozbudowanych sieciach czujników, obejmujących często dziesiątki lub setki węzłów pomiarowych, kluczowego znaczenia nabierają algorytmy trasowania danych. Ich zadaniem jest zapewnienie szybkiej, energooszczędnej i odpornej na awarie komunikacji pomiędzy elementami sieci. Dzięki zaawansowanym metodom trasowania możliwe jest dynamiczne dostosowanie struktury połączeń do bieżących warunków pracy, zmian konfiguracji wyrobiska czy awarii pojedynczych węzłów. W konsekwencji stanowią one fundament dla działania nowoczesnych systemów diagnostycznych oraz sterujących w górnictwie, umożliwiając utrzymanie spójności informacji i ciągłości nadzoru nad procesem urabiania [70].

2. Technologiczne podstawy procesu urabiania

2.1 Ogólna charakterystyka systemu ścianowego

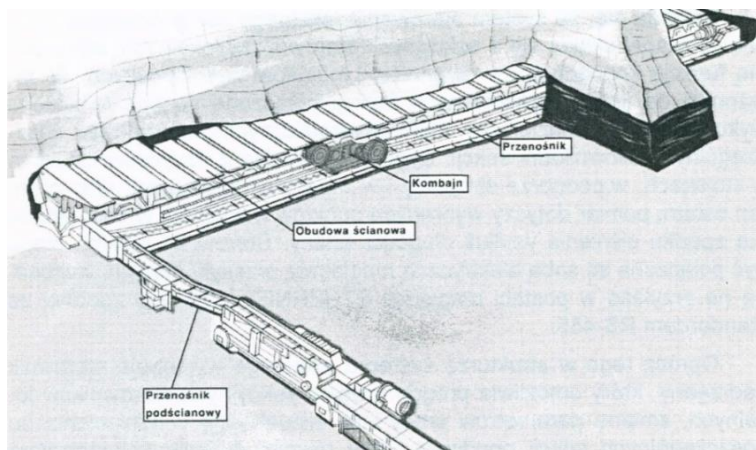
Podstawowym oraz dominującym systemem prowadzenia eksploatacji w polskim górnictwie węglowym pozostaje system ścianowy, który od wielu dekad stanowi kluczowy element organizacji produkcji w kopalniach głębinowych. Metoda ścianowa, wywodząca się z długiej tradycji rozwoju technik wydobywczych, uchodzi obecnie za jedną z najbardziej efektywnych, a zarazem najbezpieczniejszych form pozyskiwania węgla kamiennego, zwłaszcza w warunkach głębokiego zalegania pokładów. Jej wysoka renoma wynika zarówno z ugruntowanej praktyki przemysłowej, jak i z wyników licznych badań technologicznych oraz analiz eksploatacyjnych prowadzonych w krajowych zakładach górniczych. Do zasadniczych zalet eksploatacji ścianowej zalicza się przede wszystkim możliwość osiągania bardzo wysokiej wydajności urobku, przy jednoczesnym ograniczeniu bezpośredniego udziału pracowników w strefie zagrożeń. System ten, dzięki rozbudowanemu zapleczu technicznemu, stwarza szerokie możliwości automatyzacji i mechanizacji poszczególnych etapów procesu wydobywczego. W konsekwencji pozwala to nie tylko zwiększyć tempo postępu ściany, lecz również znacząco poprawić warunki pracy i bezpieczeństwo załogi. Ponadto metoda ścianowa umożliwia maksymalne wykorzystanie zasobów złoża, gdyż geometria prowadzenia eksploatacji sprzyja wysokiemu wskaźnikowi odzysku węgla z pokładu. Warto podkreślić również jej pozytywny wpływ na ograniczenie skutków wielu zagrożeń naturalnych, w tym metanowych, pożarowych czy zawałowych oraz na podniesienie efektywności systemów wentylacyjnych i kontroli parametrów atmosfery kopalnianej. Niewątpliwym atutem jest także stosunkowo ograniczony zakres robót przygotowawczych, jakie należy wykonać przed rozpoczęciem cyklu eksploatacyjnego, a także możliwość lepszej kontroli nad procesami deformacji powierzchniowych. Z technicznego punktu widzenia eksploatacja systemem ścianowym polega na odpowiednim rozcięciu pokładu węglowego poprzez wykonanie dwóch równoległych chodników — podścianowego i nadścianowego — które stanowią dostęp do pokładu i jednocześnie wyznaczają granice pola ścianowego. W kolejnym etapie oba te wyrobiska łączy się przecinką ścianową, której długość odpowiada planowanej długości ściany. W rezultacie powstaje przestrzeń robocza umożliwiającą zabudowę kompleksu ścianowego oraz rozpoczęcie właściwego procesu wybierania. Tak przygotowany układ chodników i przecinki tworzy tzw. przodek ścianowy —

podstawową jednostkę organizacyjną eksploatacji, przedstawioną schematycznie na rysunku 1 [37, 68].



Rys. 1. Schemat wyrobiska ścianowego (1 – ściana, 2 – chodnik nadścianowy, 3 – chodnik podścianowy, 4 – calizna węglowa, 5 – czoło ściany, 6 – zroby, 7 – kierunek eksploatacji, α – kąt nachylenia podłużnego ściany, H – wysokość ściany, L – długość ściany) [37]

To właśnie w obrębie przodka prowadzone są wszystkie zasadnicze operacje technologiczne związane z odspajaniem, urobkiem i transportem węgla, a także z utrzymaniem stateczności górotworu w strefie bezpośrednio przylegającej do frontu eksploatacji. Głównymi elementami opisanego systemu są: kombajn ścianowy, zmechanizowana obudowa ścianowa oraz przenośnik ścianowy (przenośnik zgrzeblowy). Elementy systemu ścianowego przedstawiono na rysunku 2 [68].



Rys. 2. Widok podstawowych elementów systemu ścianowego [32]

W kolejnych podrozdziałach omówiono szczegółowo budowę i znaczenie najważniejszych elementów kompleksu ścianowego, które stanowią podstawę rozważań dotyczących monitorowania procesu urabiania oraz zastosowania sieci sensorycznych.

2.2 Kombajn ścianowy – konstrukcja i rola w procesie urabiania

Kombajn ścianowy (rys. 3) stanowi jedno z kluczowych, a zarazem najbardziej zaawansowanych technologicznie urządzeń wykorzystywanych we współczesnym procesie podziemnej eksploatacji węgla kamiennego. Jest to maszyna o strategicznym znaczeniu dla całego systemu ścianowego, ponieważ odpowiada zarówno za właściwe odspajanie calizny węglowej, jak i za bieżące przygotowanie urobku do dalszego transportu. Dzięki swojej konstrukcji i parametrom roboczym kombajn umożliwia prowadzenie eksploatacji w sposób ciągły, zmechanizowany i w dużej mierze zautomatyzowany, co przekłada się na znaczące zwiększenie efektywności produkcji oraz ograniczenie bezpośredniego udziału pracowników w strefie przodkowej [68].



Rys. 3. Widok kombajnu ścianowego KSW-460NE1 [5]

Podstawowym zadaniem kombajnu ścianowego jest urabianie skały — głównie calizny węglowej — poprzez jej mechaniczne odspajanie za pomocą specjalistycznych organów urabiających. Równocześnie maszyna realizuje proces załadunku powstałego urobku na przenośnik ścianowy, stanowiący integralny element kompleksu wydobywczego. Kombajn przemieszcza się

wzdłuż wyrobiska ścianowego po konstrukcji przenośnika, co umożliwia wbudowany mechanizm posuwu zapewniający płynny, kontrolowany i bezpieczny postęp maszyny. Zasadniczym elementem roboczym kombajnu są dwa organy urabiające, które podczas pracy przesuwają się równolegle do frontu ściany, jednocześnie rozdrabniając caliznę. Układ tych organów jest celowo zróżnicowany: organ wyprzedzający odpowiada za skrawanie górnych warstw pokładu, przygotowując je do dalszej obróbki, natomiast drugi organ realizuje urabianie dolnej części calizny. Takie rozwiązanie konstrukcyjne pozwala na zwiększenie równomierności urabiania, utrzymanie wymaganych parametrów przekroju ściany oraz optymalizację procesu odspajania materiału. Warto podkreślić, że kombajny ścianowe projektowane są z myślą o pracy w szczególnie trudnych i zróżnicowanych warunkach geologicznych, jakie cechują wiele krajowych pokładów węgla. Od maszyn wymaga się więc wysokiej niezawodności, odporności na drgania oraz zdolności do pracy w środowisku zawierającym liczne nieciągłości skał, soczewki kamienia czy zmienną miąższość pokładu. Dzięki temu stosowanie kombajnów istotnie zwiększa wydajność eksploatacji, jednocześnie minimalizując ryzyko zagrożeń naturalnych i ograniczając potrzebę przebywania załogi bezpośrednio w przodku, co stanowi istotny element poprawy bezpieczeństwa pracy [68].

2.3 Przenośnik ścianowy (zgrzeblowy) – budowa i funkcjonowanie

Przenośnik ścianowy, często określany również mianem przenośnika zgrzeblowego, stanowi jeden z kluczowych elementów mechanicznego systemu transportu urobku w podziemnych zakładach górniczych. Jego podstawową funkcją jest odbiór węgla bezpośrednio z przestrzeni roboczej ściany oraz ciągłe przemieszczanie go wzdłuż całej długości wyrobiska do punktu przekazania, skąd urobek trafia do głównego systemu transportowego kopalni. Tego rodzaju urządzenie umożliwia utrzymanie nieprzerwanego rytmu eksploatacji, co sprzyja zwiększeniu efektywności procesu wydobywczego oraz minimalizuje przestoje związane z obsługą transportu. Przenośnik zgrzeblowy (rys. 4) jest konstrukcją o wysokiej odporności mechanicznej, zdolną do pracy w warunkach występujących w rejonie przodka, gdzie panują duże obciążenia dynamiczne, zapylenie oraz zmienne warunki geologiczne. Podstawowym elementem roboczym urządzenia jest układ ciągnowy składający się z dwóch równoległych łańcuchów, do których mocowane są zabieraki, zwane także zgrzeblami [10].



Rys. 4. Widok przenośnika zgrzeblowego [86]

To właśnie zabieraki odpowiadają za przemieszczanie urobku wzdłuż rynny przenośnika — przesuwają one materiał w sposób ciągły, zapewniając rytmiczne i kontrolowane tempo transportu, niezależne od warunków otoczenia. Takie rozwiązanie konstrukcyjne gwarantuje niezawodność działania przenośnika przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej wydajności roboczej. Ponieważ przenośnik ścianowy współpracuje bezpośrednio z kombajnem ścianowym oraz obudową zmechanizowaną, jego rola w całym systemie wydobywczym jest nie do przecenienia — stanowi on bowiem element łączący proces urabiania z dalszymi etapami transportu. Z tego względu urządzenie projektuje się z myślą o maksymalnej trwałości, odporności na zużycie oraz możliwości pracy w najbardziej wymagających warunkach eksploatacyjnych, co potwierdzają wieloletnie zastosowania w krajowych kopalniach [10].

2.4 Zmechanizowana obudowa ścianowa – budowa i eksploatacja

Zmechanizowana obudowa ścianowa (rys. 5) zapewnia stabilność oraz ogólne bezpieczeństwo wyrobiska ścianowego. Jej nadrzędnym zadaniem jest skuteczna ochrona personelu pracującego w przodku, a także zabezpieczenie pozostałych urządzeń eksploatacyjnych, które współtworzą kompleks ścianowy. Konstrukcja obudowy składa się z zespołu sekcji hydraulicznych, przemieszczających się stopniowo wzdłuż ściany w miarę postępu prac

urabiających. Każda sekcja przejmuje obciążenia stropu i górotworu, co zapobiega jego niekontrolowanemu osuwaniu się lub zapadaniu. Tak zorganizowany system podporowy stanowi niezbędny element bezpiecznego prowadzenia eksploatacji, gdyż umożliwia utrzymanie stabilności wyrobiska nawet w warunkach zmiennej jakości skał. Zmechanizowana obudowa ścianowa odgrywa więc szczególnie istotną rolę w minimalizowaniu zagrożeń naturalnych i znaczącym podnoszeniu poziomu bezpieczeństwa pracy górników, co potwierdzają doświadczenia praktyczne i liczne analizy stosowane w górnictwie podziemnym [10].

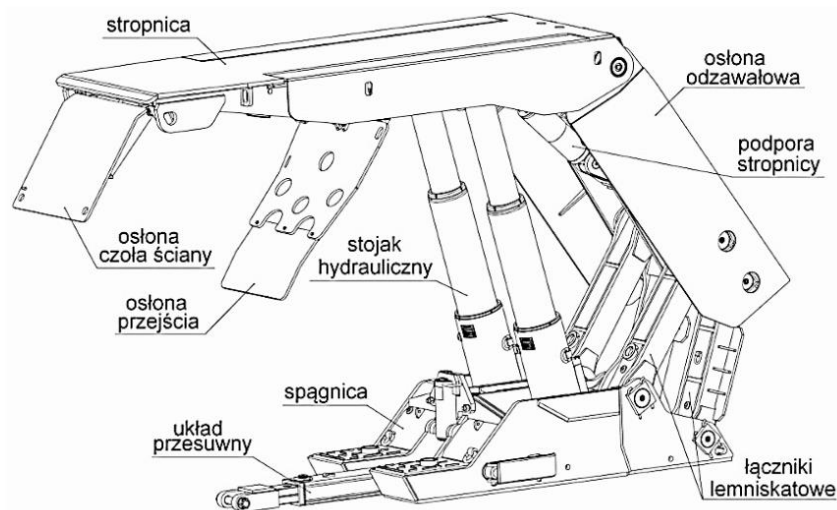


Rys. 5. Widok sekcji obudowy zmechanizowanej [80]

Opisany kompleks ścianowy – obejmujący kombajn, przenośnik i obudowę – stanowi podstawę zmechanizowanej eksploatacji pokładów węgla. W dalszej części monografii przedstawiono szczegółową budowę pojedynczej sekcji obudowy oraz zagadnienia związane z jej monitorowaniem.

2.5 Sekcja obudowy zmechanizowanej – elementy konstrukcyjne i ich funkcje

Kluczowym kryterium determinującym konstrukcję sekcji obudowy zmechanizowanej jest zapewnienie właściwej interakcji pomiędzy sekcją a górotworem, przy jednoczesnym uwzględnieniu specyficznych warunków geologiczno-górnich danego wyrobiska ścianowego. Poszczególne elementy sekcji realizują odrębne zadania konstrukcyjne i funkcjonalne, co umożliwia prawidłowe wykonanie czynności, do których obudowa została zaprojektowana (rys. 6) [66, 2].



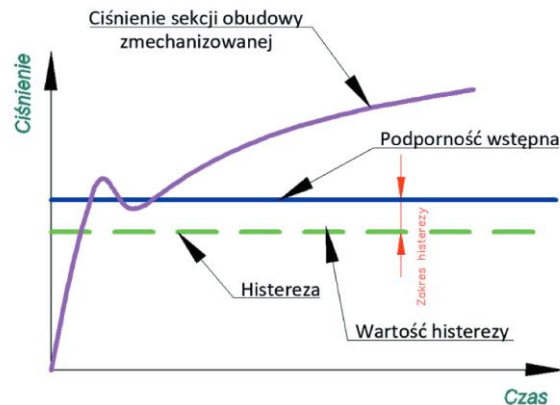
Rys. 6. Widok oraz elementy składowe sekcji obudowy zmechanizowanej [66]

Do głównych elementów sekcji obudowy zmechanizowanej należą:

- stropnica - jest górnym elementem sekcji obudowy zmechanizowanej, który bezpośrednio przylega do stropu wyrobiska; jej zadaniem jest podtrzymywanie stropu i przenoszenie obciążeń na pozostałe elementy sekcji; zapewnia ochronę pracowników i sprzętu znajdującego się pod nią [67, 33, 59],
- stojak hydrauliczny - jest podstawowym elementem nośnym sekcji obudowy; składa się z cylindrów hydraulicznych, które mogą być wysuwane i wsuwane, umożliwiając tym samym regulację wysokości obudowy oraz zapewniać jej stabilność; przenosi obciążenia ze stropnicy na spąg wyrobiska [62, 59, 20],
- osłona odzawałowa - znajduje się z tyłu sekcji obudowy i służy do ochrony wyrobiska przed spadającymi fragmentami skał po zawałach; jej funkcja jest szczególnie istotna w warunkach dużego zagrożenia tąpnięciami i zawałami, ponieważ zabezpiecza tylne części sekcji i pracowników [59, 34, 51],
- spągnica - stanowi dolną część sekcji obudowy, która opiera się na podłożu wyrobiska; jej zadaniem jest stabilizacja całej konstrukcji oraz przenoszenie obciążeń na spąg; jest również punktem mocowania stojaka hydraulicznego i innych elementów sekcji obudowy zmechanizowanej [51, 50, 31].

W trakcie eksploatacji ściany konieczne jest regularne monitorowanie i regulacja sekcji obudowy. Sekcje muszą być dostosowywane do postępującego wydobywania poprzez ręczne lub automatyczne sterowanie siłownikami hydraulicznymi, przy czym kluczowe jest zachowanie podporności sekcji w celu uniknięcia obwałów skał (zapewnienie stabilności górotworu oraz ochrony pracowników przed obsypywaniem się skał). Precyzyjne pozycjonowanie i sterowanie sekcjami są niezbędne do ciągłej i bezpiecznej eksploatacji. Chociaż obudowy zmechanizowane stanowią kluczowe zasoby w aspektach zapewnienia efektywności procesu urabiania i bezpieczeństwa, monitorowanie ich parametrów eksploatacyjnych jest stosunkowo rzadkie. W celu precyzyjnego prowadzenia ściany stosuje się jednak systemy monitoringu sekcji obudowy zmechanizowanej, które odgrywają kluczową rolę w predykcji zagrożeń związanych z obwałami i zawałami skał. W praktycznych rozwiązaniach stosuje się również systemy monitorujące wybrane parametry eksploatacyjne, takie jak wartości ciśnienia w stojakach hydraulicznych niezbędne do analizy kondycji stropu. Monitoring ciśnienia w stojakach hydraulicznych pozwala określić wartość podporności wstępnej sekcji. Podporność wstępna definiowana jest jako wartość ciśnienia uzyskiwanego podczas procesu rozpierania obudowy. Opisany parametr wpływa na cały cykl pracy sekcji obudowy zmechanizowanej i efektywną zdolność przenoszenia obciążeń pochodzących od górotworu [59, 34, 20, 15, 10].

Bardzo ważnym czynnikiem eksploatacyjnym jest właściwe ustawienie wartości podporności wstępnej. Po uzyskaniu przez sekcję stanu podporności wstępnej reakcja górotworu na obudowę (mierzona poprzez wartość spadku ciśnienia) nie może być większa niż 5% (rys. 7). Nieprawidłowe rozparcie sekcji może wpływać na asymetryczne obciążenie stojaków, skutkujące niestabilnością, przyspieszonym zużyciem elementów eksploatacyjnych oraz zmniejszeniem bezpieczeństwa i pewności pracy [28, 38].

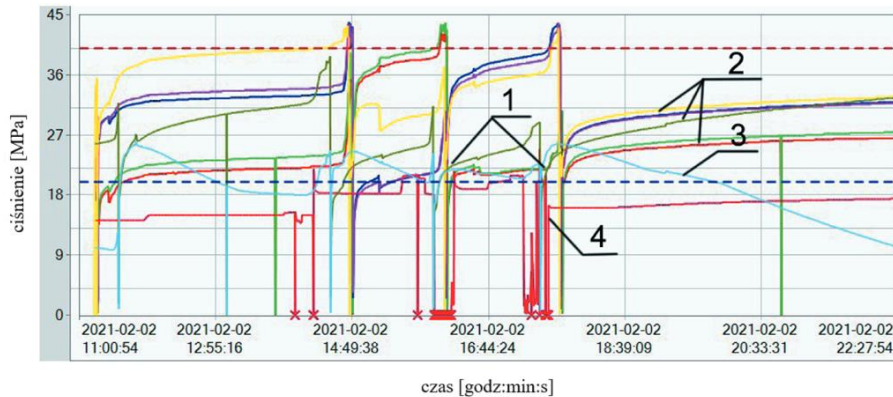


Rys. 7. Przebieg charakterystyki ustawiania wartości podporności wstępnej [38]

Na rysunku 8 przedstawiono przykładowe charakterystyki zmian wartości ciśnienia czterech wybranych sekcji (w każdej sekcji znajdowały się dwa czujniki ciśnienia, po jednym w każdym z dwóch siłowników hydraulicznych), w trakcie procesu urabiania. Charakterystyka 1 obrazuje przebieg wartości ciśnienia w siłownikach hydraulicznych stojaka hydraulicznego w trakcie cyklu produkcyjnego, następnie obserwowany jest przebieg zabudowy sekcji w ścianie. Przebiegi czasowe 2 przedstawiają prawidłowe przyrosty ciśnienia po zabudowie sekcji. Charakterystyka 3 obrazuje awarię jednego ze stojaków sekcji objawiającą się gwałtownym spadkiem wartości mierzonej, natomiast przebieg 4 uszkodzenie czujnika stojaka (mierzone wartości ciśnienia zmieniają się przypadkowo, nie odpowiadając prawidłowym wartościom podczas pracy sekcji w ścianie). W celu precyzyjnej kontroli działania konieczny jest również monitoring położenia głównych elementów sekcji obudowy zmechanizowanej. Zachowanie właściwej geometrii sekcji (tj. równoległości powierzchni stropnicy i spągnicy) jest kluczowe do prawidłowej interakcji obudowy z górotworem [38].

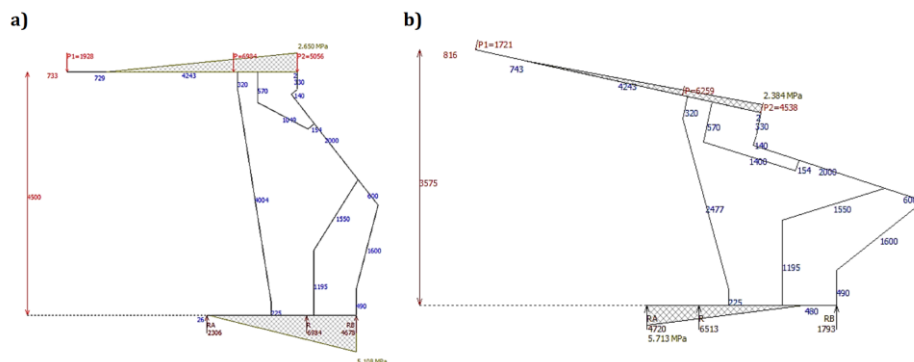
Na rysunku 9 przedstawiono zależność wpływu położenia stropnicy na obciążenie spągu wyrobiska ścianowego. W przypadku podniesionej stropnicy (rys. 9b) największe obciążenia na spąg występują bliżej ociosu. Może to powodować w skrajnych przypadkach utratę stateczności oraz zatapianie sekcji w spągu. Szczególnie ważne jest to w warunkach występowania słabych skał stropowych ściany lub pod gruzowiskiem zawałowym. W takich sytuacjach należy precyzyjnie operować sekcjami obudowy, aby uniknąć liniowego kontaktu stropnicy ze stropem prowadzącego do uszkodzeń skał stropowych.

Ponadto, niewłaściwa geometria sekcji wpływa na nierównomierny rozkład nacisków spągnicy na spąg, co może destabilizować konstrukcję [31, 57].



Rys. 8. Charakterystyki czasowe pomiarów do celów diagnostyki ciśnienia oleju w stojakach hydraulicznych sekcji obudowy zmechanizowanej [38]

1 - cykl produkcji i następująca po nim zabudowa sekcji 2 - prawidłowe przyrosty wartości ciśnienia w stojakach następujące po zabudowie sekcji w ścianie, 3 - wykres wartości ciśnienia w stojaku świadczący o awarii jednego ze stojaków sekcji 4 - wykres wartości ciśnienia w stojaku



Rys. 9. Rozkład nacisków na strop i spąg obudów w zależności od geometrii sekcji: a) stropnica równoległa do spągnicy, b) stropnica podniesiona pod kątem 12° [31]

Istotnym elementem, który należy również brać pod uwagę w monitorowaniu pracy sekcji obudowy zmechanizowanej jest pomiar wartości odległości sekcji od czoła ściany. Opisany parametr umożliwia określenie szerokości ścieżki przedczołowej definiującej jednocześnie rozpiętość wyrobiska ścianowego oraz wynikowe obciążenia górotworu. Zarówno badania w terenie, jak i obliczenia numeryczne wykazały, że szerokość tej ścieżki determinuje

zasięg strefy spękań wokół wyrobiska. Uszkodzenia górotworu nad obudową przyjmują kształt klina, który może się przemieszczać po wydobyciu węgla. Strefa spękań stanowi obszar potencjalnego opadu skał, co negatywnie wpływa na współpracę obudowy z górotworem [4, 28, 54].

Wspomaganie pracy przy równoczesnym zapobieganiu błędom operatora możliwe jest tylko poprzez monitorowanie podstawowych parametrów eksploatacyjnych sekcji obudowy oraz analizowanie zmian i trendów parametrów w czasie rzeczywistym. Analiza ta może posłużyć predykcji wystąpienia opisanych zjawisk, a także (po sprzężeniu z systemem sterowania pracą sekcji) zapobieganiu ich wystąpienia [28].

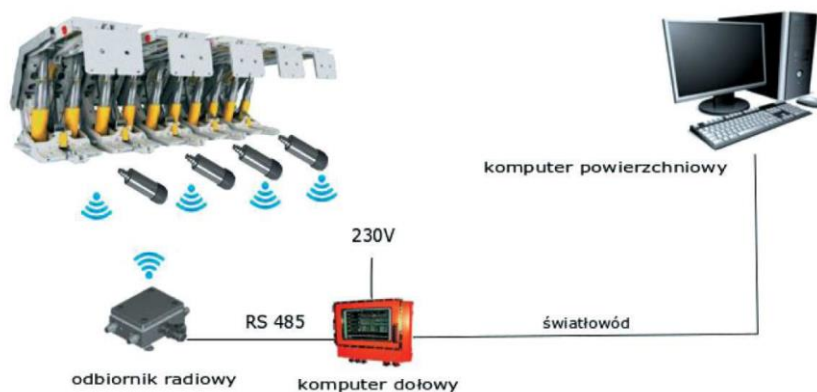
Podsumowując, sekcje obudowy zmechanizowanej pełnią funkcje zabezpieczenia sprzętu i załogi podczas procesu eksploatacji ściany wydobywczej. Precyzyjne położenie sekcji w wyrobisku jest kluczowe ze względów zapewnienia ciągłości procesu wydobywania i jego bezpieczeństwa. Monitoring pracy parametrów sekcji (takich jak wartość ciśnienia oleju w stojakach hydraulicznych, geometrii sekcji – tj. położenia wybranych elementów sekcji względem wyrobiska oraz odległości od czoła ściany) umożliwi rozpoznanie potencjalnych problemów strukturalnych. Wspomniane elementy pozwolą równocześnie na dostosowanie metod eksploatacji i zabezpieczeń (na podstawie zebranych danych), a także predykcję podstawowych zagrożeń (zawały i obwały skał).

2.6 Systemy monitorowania podporności i geometrii obudowy zmechanizowanej – przegląd

Jednym z kluczowych wyzwań współczesnej eksploatacji ścianowej jest zapewnienie właściwej współpracy obudowy zmechanizowanej z górotworem. Stabilność sekcji, ich geometryczne położenie oraz właściwa wartość podporności stanowią podstawę bezpiecznego prowadzenia eksploatacji, dlatego w ostatnich latach obserwuje się intensywny rozwój systemów pozwalających na monitorowanie parametrów pracy sekcji w czasie rzeczywistym. Na rynku funkcjonuje kilka grup rozwiązań pomiarowych, różniących się zakresem rejestrowanych wartości, sposobem transmisji danych oraz poziomem integracji z sieciami czujników stosowanymi w kompleksach ścianowych.

2.6.1 Systemy monitorowania ciśnienia w stojakach hydraulicznych

Monitoring ciśnienia w stojakach hydraulicznych jest podstawową metodą oceny podporności sekcji obudowy zmechanizowanej. Wartość ciśnienia w siłownikach stanowi bezpośredni wskaźnik obciążenia przenoszonego przez obudowę, a jej zmienność w cyklu pracy sekcji pozwala identyfikować zjawiska niebezpieczne, takie jak utrata nośności, asymetryczne obciążenie stojaków czy nieprawidłowe rozparcie obudowy. Na rynku występuje obecnie kilka typów rozwiązań systemów do monitoringu sekcji obudów zmechanizowanych. Jednym z nich jest bezprzewodowy system monitorowania ciśnienia w stojakach hydraulicznych autorstwa firmy DOH Sp. z o.o. (rys. 10). System realizuje monitorowanie ciśnienia w stojakach hydraulicznych sekcji obudowy zmechanizowanej, poprzez ciągły pomiar i analizę wartości ciśnień w podtłokowych częściach siłowników stojaków [64, 55, 29, 28, 8].



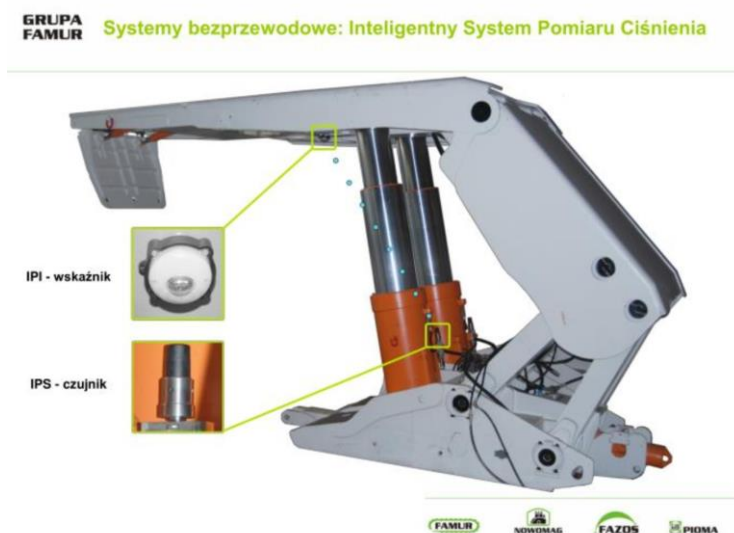
Rys. 10. Schemat systemu bezprzewodowego pomiaru ciśnienia [8]

System zbiera dane, które są następnie przesyłane do centralnego serwera danych technologicznych CSDT. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie szerokiej oceny współpracy obudowy z górotworem, co pozwala na szybką reakcję na ewentualne nieprawidłowości. Pomiędzy magistralą ciśnienia i stojakiem hydraulicznym montowane są bezprzewodowe czujniki ciśnienia typu DROPS-01 (rys. 11). Dane z czujników przekazywane są bezprzewodowo do odbiornika radiowego, a następnie magistralą RS485 do komputera dołowego. Z komputera dołowego do centrali naziemnej dane przekazywane są poprzez światłowód (rys. 10) [8, 64].



Rys. 11. Czujnik ciśnienia [68]

Podobną koncepcję zastosowano w systemie RSPC firmy Famur S.A. (rys. 12). Rozwiązanie to wykorzystuje czujnik IPS oraz dodatkowy wskaźnik optyczny IPI montowany bezpośrednio na sekcji, co umożliwia lokalną sygnalizację stanów przeciążenia bez konieczności analizy sygnałów w centrum danych [89, 90]. Przykładowe elementy systemu przedstawiono na rysunku 12 i 13.



Rys. 12. Widok systemu pomiaru ciśnienia RSPC [88]



Rys. 13. Widok czujnika ciśnienia IPS oraz wskaźnika IPI [87]

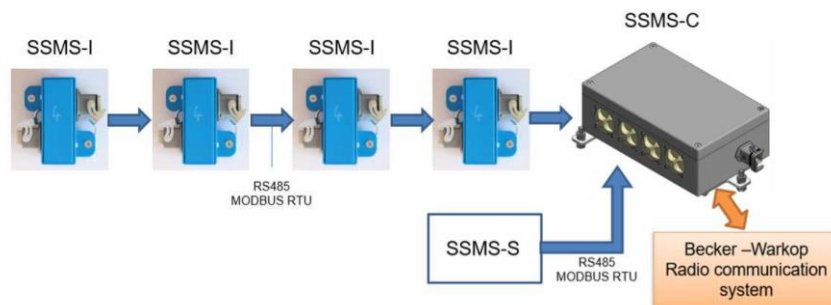
Oba systemy umożliwiają rejestrację wartości statycznych ciśnienia i ich transfer do systemów nadzoru technologicznego. Ograniczeniem rozwiązań bezprzewodowych pozostaje jednak czas pracy bateryjnej, co wpływa na częstotliwość próbkowania i realne możliwości monitorowania zmian dynamicznych. W literaturze opisano również przewodowe systemy pomiarowe opracowane na potrzeby badań stanowiskowych, niewystępujące w klasycznych wdrożeniach przemysłowych. Systemy te umożliwiają rejestrację ciśnienia z wysoką częstotliwością (1–5 kHz), jednak ich zastosowanie w ścianie jest praktycznie niemożliwe ze względu na ryzyko uszkodzeń przewodów w trakcie pracy kompleksu ścianowego. Powoduje to, że praktyka górnicza jednoznacznie preferuje rozwiązania bezprzewodowe, mimo ich ograniczeń energetycznych [59].

2.6.2 Systemy monitorowania geometrii sekcji obudowy zmechanizowanej

Oprócz pomiarów ciśnienia w stojakach hydraulicznych istotnym obszarem diagnostyki obudowy zmechanizowanej jest kontrola jej geometrii. Parametry takie jak położenie stropnicy i spągnicy, kąty wychylenia elementów konstrukcyjnych czy odległość sekcji od czoła ściany mają kluczowe znaczenie dla prawidłowej współpracy obudowy z górotworem. Nawet niewielkie odchylenia geometryczne mogą prowadzić do pogorszenia stateczności sekcji, zmiany rozkładu obciążeń, zwiększonego osiadania w spągu czy rozwoju stref spękań w stropie. Jednym z rozwiązań opracowanych w zakresie monitorowania geometrii obudowy zmechanizowanej jest system SSMS (ang. Shield Support Monitoring System), powstały w ramach projektu PRASS III „Wydajność

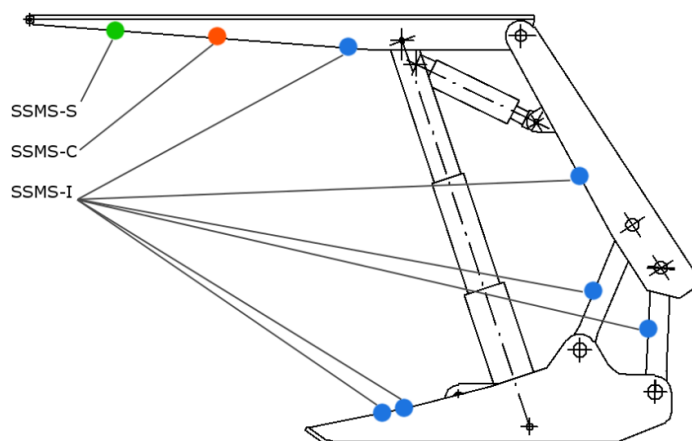
i bezpieczeństwo obudowy zmechanizowanej” realizowanego w ramach Europejskiego Funduszu Węgla i Stali [28, 29] (rys. 14 i 15). System pracuje w obrębie jednej sekcji i został zaprojektowany zgodnie z wymaganiami dyrektywy ATEX [77, 78, 81].

Jego konstrukcja obejmuje mierniki położenia SSMS-I, instalowane na wybranych elementach sekcji obudowy zmechanizowanej, oraz moduł pomiaru odległości od czoła ściany SSMS-S, zabudowany na stropnicy. Dane pomiarowe przesyłane są do jednostki centralnej SSMS-C za pomocą przewodowej komunikacji w standardzie MODBUS RTU, a następnie – poprzez moduł radiowy – integrowane z siecią pomiarową czujników ciśnienia firmy Becker-Warkop [28].



Rys. 14. Widok systemu pomiaru geometrii obudowy zmechanizowanej SSMS [28]

System składa się z inklinometrów SSMS-I zamontowanych na poszczególnych elementach sekcji obudowy zmechanizowanej (pomiar położenia elementów obudowy) oraz modułu pomiaru odległości od czoła ściany SSMS-S zamontowanego jest na czole stropnicy. Dane przekazywane są do jednostki centralnej SSMS-C ze wszystkich elementów drogą przewodową (za pomocą protokołu MODBUS RTU) [28].



Rys. 15. Widok rozmieszczenia elementów systemu SSMS na elementach sekcji obudowy zmechanizowanej [28]

System został przetestowany w trzech polskich kopalniach. Testy potwierdziły przydatność pomiarów geometrii w diagnostyce sekcji, jednak jednocześnie ujawniły ograniczenia praktyczne. W warunkach rzeczywistej eksploatacji przewody łączące inklinometry z jednostką centralną były narażone na uszkodzenia, a transmisja radiowa pomiędzy modułami nie była stabilna. W efekcie występowały przerwy w akwizycji danych oraz problemy synchronizacyjne. Wnioski te jednoznacznie wskazują, że skuteczne i długotrwałe monitorowanie geometrii w warunkach ścianowych wymaga całkowitego wyeliminowania połączeń kablowych na rzecz rozwiązań w pełni bezprzewodowych. Kolejnym krokiem rozwojowym jest zastosowanie niezawodnych metod poprawy komunikacji między czujnikami – w szczególności algorytmów zarządzających transmisją w sieciach o topologii Mesh, odpornych na zmienność warunków eksploatacyjnych [28].

2.6.3 Wnioski z analizy dostępnych systemów monitorowania

Przegląd obecnie stosowanych rozwiązań monitorujących podporność oraz geometrię sekcji obudowy zmechanizowanej pozwala sformułować kilka istotnych obserwacji:

- Systemy monitoringu mają charakter rozproszony, a każdy czujnik funkcjonuje jako niezależny węzeł pomiarowy.

- Bezprzewodowa transmisja danych jest koniecznością, ponieważ przewody ulegają uszkodzeniom podczas pracy kompleksu ścianowego.
- Czujniki zasilane bateryjnie mają ograniczoną częstotliwość próbkowania, co wymusza stosowanie energooszczędnych metod komunikacji.
- Obecnie stosowane systemy (DOH, RSPC, SSMS) nie rozwiązują kluczowych problemów związanych z:
 - nieregularnym układem przestrzennym sekcji,
 - zmienną liczbą węzłów w czasie eksploatacji,
 - zakłóceniami propagacji fal radiowych,
 - awaryjnością elementów,
 - potrzebą niskiej latencji transmisji.
- Wymaga to opracowania nowych algorytmów zarządzających ruchem danych, uwzględniających:
 - energooszczędność,
 - niezawodność,
 - redundancję,
 - adaptacyjność do zmian konfiguracji sieci.

Wnioski te stanowią naturalne uzasadnienie dla dalszych analiz opisanych w kolejnych rozdziałach monografii, dotyczących budowy sieci sensorycznych w warunkach ścianowych oraz projektowania algorytmów trasowania danych zoptymalizowanych pod wymagania eksploatacji podziemnej.

2.7 Warunki pracy w podziemiach kopalń węgla kamiennego a wymagania stawiane urządzeniom

Urządzenia pracujące w systemach monitoringu kompleksu ścianowego muszą spełniać szereg wymagań wynikających z ekstremalnych warunków środowiskowych, w jakich przebiega proces wydobywania węgla kamiennego. Środowisko to charakteryzuje się m.in.:

- Wysokim poziomem zapylenia – stężenie pyłu (wyznaczane metodą grawimetryczną jako wartość średnia) w przodku wyrobiska

korytarzowego drążonego przy użyciu kombajnu chodnikowego może wynosić do 100 mg/m^3 [39]. Zazwyczaj stężenie pyłu jest niższe i nie przekracza wartości 40 mg/m^3 , jednak chwilowe wartości mogą być wielokrotnie wyższe. W ekstremalnych warunkach chwilowe stężenie pyłu może osiągać nawet kilkaset mg/m^3 . Przepisy określają, że najwyższe dopuszczalne stężenie (NDS) pyłu na stanowisku pracy w kopalni musi mieścić się w zakresie $1\text{--}10 \text{ mg/m}^3$, w zależności od zawartości wolnej krzemionki, przy czym wartość średnia mierzona jest w ciągu całej zmiany [3, 79].

- Podwyższoną temperaturą – temperatura powietrza w kopalni zależy od wielu czynników, takich jak temperatura i ciśnienie doprowadzanego powietrza, temperatura skał, intensywność przewietrzania, głębokość prowadzenia robót, reakcje chemiczne zachodzące w górotworze, a także od pracy maszyn, ludzi i robót strzałowych. Temperatura skał wzrasta wraz z głębokością, co sprawia, że w głębokich kopalniach węgla można oczekiwać wysokich temperatur, szczególnie w rejonie przodków. Często konieczne jest obniżanie temperatury poprzez zwiększenie ilości i prędkości przepływu powietrza, stosowanie urządzeń chłodzących lub izolacji cieplnej głównych dróg wentylacyjnych. Zgodnie z przepisami temperatura w miejscu pracy nie powinna przekraczać 28°C ; przy temperaturze $28\text{--}33^\circ\text{C}$ czas pracy powinien być skrócony do 6 godzin, natomiast powyżej 33°C dopuszcza się pracę jedynie w warunkach akcji ratowniczej [20, 79, 80].
- Możliwością wystąpienia wybuchowego stężenia metanu – podczas eksploatacji złóż może dojść do niekontrolowanego uwolnienia metanu. Gaz ten, w stężeniu $5\text{--}15\%$ w mieszaninie z powietrzem, tworzy atmosferę wybuchową. Do zapłonu i wybuchu metanu konieczny jest czynnik inicjujący, którym może być pożar endogeniczny, roboty strzałowe, iskry powstałe w wyniku tarcia skał lub procesu urabiania, a także nieodpowiednio zabezpieczone urządzenia elektryczne pracujące w kopalni [7].

W kopalniach węgla kamiennego zdefiniowano ścisłe wymagania dotyczące budowy urządzeń stosowanych w strefach zagrożenia wybuchem, w jakiej pracują. Wymagania te określa dyrektywa ATEX 2014/34/UE oraz normy z nią zharmonizowane [77, 78, 81].

Przy projektowaniu urządzeń należy uwzględnić m.in. odpowiedni stopień ochrony przed wnikaniem pyłu i wody, określony za pomocą wskaźnika IP (Ingress Protection) (Tabela 1).

Stopień IP wyrażany za pomocą dwóch cyfr IP XY [40, 83], gdzie: X – ochrona przed ciałami stałymi, Y – ochrona przed wilgocią i wodą

Tabela 1.

X	opis	Y	opis
0	Brak ochrony	0	Brak ochrony
1	Ochrona przed ciałami stałymi o średnicy większej niż 50 mm	1	Ochrona przed kroplami wody
2	Ochrona przed ciałami stałymi o średnicy większej niż 12,5 mm	2	Ochrona przed padającymi kroplami wody przy wychyleniu obudowy o dowolny kąt do 15° od pionu w każdą stronę
3	Ochrona przed ciałami stałymi o średnicy większej niż 2,5 mm	3	Ochrona przed padającymi kroplami wody pod dowolnym kątem do 60° od pionu z każdej strony
4	Ochrona przed ciałami stałymi o średnicy większej niż 1 mm	4	Ochrona przed padającą wodą z dowolnego kierunku
5	Ochrona przed pyłem	5	Ochrona przed strugą wody
6	Ochrona pyłoszczelna	6	Ochrona przed silnym strugą wody
-	-	7	Ochrona przed czasowym zanurzeniem w wodzie
-	-	8	Ochrona przed ciągłym zanurzeniem w wodzie w określonych warunkach

Minimalne wymagania stawiane urządzeniom pracującym w podziemiach kopalń to poziom szczelności co najmniej IP54 [77]. Dodatkowo zdefiniowano grupy klasyfikacji stref zagrożonych wybuchem w postaci:

- Grupy I - obejmującej urządzenia i systemy ochronne przeznaczone do użytku w zakładach górniczych, gdzie występuje ryzyko metanowe lub zagrożenie wybuchem pyłu węglowego [41, 83],

- Grupy II - dotyczącej urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do stosowania w miejscach innych niż zakłady górnicze, gdzie istnieje ryzyko wybuchu [41, 83].

Normy dzielą również poszczególne grupy na kategorie. W grupie I występując dwie kategorie [41, 83]:

- Kategoria M1 - obejmuje urządzenia zaprojektowane oraz w razie potrzeby, wyposażone w specjalne dodatkowe zabezpieczenia przeciwwybuchowe, które umożliwiają ich działanie zgodnie z parametrami określonymi przez producenta. Urządzenia te zapewniają bardzo wysoki poziom ochrony nawet w atmosferach wybuchowych, również w przypadku rzadkich uszkodzeń. Charakteryzują się one następującymi cechami [41, 83]:
 - w przypadku awarii jednego z zabezpieczeń, przynajmniej jedno inne, niezależne zabezpieczenie zapewnia wymagany poziom ochrony lub poziom ochrony jest utrzymany przy wystąpieniu dwóch niezależnych awarii,
 - źródła zapłonu w urządzeniu nie mogą się aktywować, nawet w przypadku rzadkich uszkodzeń. Urządzenia te są wyposażone w specjalne zabezpieczenia, które działają w atmosferze wybuchowej.
- Kategoria M2 - obejmuje urządzenia zaprojektowane i wykonane w taki sposób, że mogą działać zgodnie z parametrami ustalonymi przez producenta, zapewniając wysoki poziom ochrony. W urządzeniach tej kategorii producent gwarantuje [41, 83]:
 - wyłączenie zasilania w przypadku wystąpienia atmosfery wybuchowej,
 - zabezpieczenia przeciwwybuchowe, które zapewniają wymagany poziom ochrony podczas normalnej pracy urządzeń oraz w trudnych warunkach eksploatacji, wynikających z nieostrożnego użytkowania i zmieniających się warunków środowiskowych.

W przypadku urządzeń pracujących w grupie I stosuje się różne rodzaje zabezpieczeń w zależności od poziomu kategorii urządzenia (Tabela 2).

Rodzaje zabezpieczeń stosowane w urządzeniach pracujących w grupie I [16, 85]

Tabela 2.

Rodzaj zabezpieczenia	Urządzenia grupy I	
	Kategoria M1	Kategoria M2
Oslony ognioszczelne „d”	„da”	„db”
Budowa wzmocniona „e”	-	„eb”
Iskrobezpieczeństwo „i”	„ia”	„ib”
Hermetyzacja „m”	„ma”	„mb”
Oslona piaskowa „q”	-	„ob”
Oslony gazowe z nadciśnieniem „p”	-	„pxb”
Zabezpieczenia urządzeń oraz systemów transmisji wykorzystujących promieniowanie optyczne	„op is”	„op is” „op pr” „op sh”

Projektując urządzenia, które będą pracować w warunkach środowiskowych podziemi kopalń węgla kamiennego, należy uwzględnić i stosować wszystkie wymagania określone w dyrektywie ATEX oraz normach z nią zharmonizowanych. Sieci sensoryczne monitorujące parametry pracy sekcji obudowy zmechanizowanej funkcjonują w środowisku zagrożonym wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego, co oznacza konieczność zaprojektowania poszczególnych węzłów sieci zgodnie z odpowiednim poziomem zabezpieczeń przeciwwybuchowych. Elementy te powinny być konstruowane w taki sposób, aby przy zastosowaniu wymaganych środków ochronnych zachowane zostały ich kluczowe parametry funkcjonalne, w szczególności niskie zużycie energii, niezawodność transmisji danych oraz odporność na warunki eksploatacyjne.

3. Algorytmy trasowania w bezprzewodowych sieciach sensorycznych

3.1 Wprowadzenie do algorytmów trasowania

Wraz z upowszechnieniem bezprzewodowych sieci sensorycznych w górnictwie podziemnym coraz większego znaczenia nabiera sposób organizacji transmisji danych pomiarowych. Czujniki zabudowane na sekcjach obudowy zmechanizowanej oraz innych elementach kompleksu ścianowego tworzą rozproszoną infrastrukturę monitorującą, która dostarcza informacji o stanie maszyn, warunkach geomechanicznych i zagrożeniach naturalnych. Węzły te komunikują się ze sobą bezprzewodowo, zwykle zasilane są bateryjnie i pracują w środowisku o wysokim poziomie zapylenia, podwyższonej temperaturze oraz potencjalnej obecności metanu i pyłu węglowego.

W takiej sytuacji kluczowym zagadnieniem staje się trasowanie pakietów danych – czyli wybór ścieżek, po których informacje są przekazywane od czujników do jednostki nadrzędnej. Od jakości zastosowanego algorytmu trasowania zależy nie tylko niezawodność i opóźnienie transmisji, ale również czas życia całej sieci.

Czujniki stosowane w systemach monitoringu kompleksu ścianowego, opisane w rozdziałach 1 i 2, są wyposażone w bezprzewodowe interfejsy transmisyjne i pracują najczęściej w trybie baterijnym. Tworzą one rozproszoną infrastrukturę pomiarową, która umożliwia ciągłą rejestrację parametrów pracy sekcji obudowy zmechanizowanej, a następnie przekazywanie danych do nadrzędnych systemów diagnostycznych i sterujących [2, 31, 61]. Sprawność takiej sieci zależy nie tylko od poprawności działania samych czujników, ale w dużej mierze od sposobu, w jaki dane są rozgłaszane i zbierane w sieci.

Bezprzewodowe sieci sensoryczne składają się z wielu niewielkich, niskoenergetycznych węzłów, które mają ograniczoną pojemność pamięci oraz moc obliczeniową. Ograniczeniem krytycznym jest dostępna energia – zwykle zmagazynowana w baterii, którą w warunkach kopalnianych trudno jest wymieniać w krótkich odstępach czasu. Z tego powodu klasyczne mechanizmy trasowania, projektowane pierwotnie z myślą o sieciach ad hoc, nie zawsze sprawdzają się w WSN (ang. Wireless Sensor Network) [36, 49, 83].

Zadaniem algorytmów trasowania w sieciach sensorycznych jest zapewnienie możliwie optymalnego przebiegu dostarczenia pakietu danych od nadawcy do odbiorcy, przy uwzględnieniu zestawu kryteriów [1], takich jak:

- przebieg trasy (np. liczba przeskoków, jakość łącza, odległość),
- prostota i możliwość implementacji na węzłach o ograniczonych zasobach,
- odporność na awarie węzłów i łączy,
- szybkość konwergencji, czyli czas potrzebny na dostosowanie tras do zmian w sieci,
- elastyczność i możliwość adaptacji do zmieniającej się topologii,
- dodatkowe wymagania aplikacyjne (QoS, priorytetyzacja danych, specyficzne ograniczenia środowiskowe).

W przypadku sieci monitorującej sekcje obudowy zmechanizowanej sytuacja jest szczególna. W odróżnieniu od wielu zastosowań WSN, gdzie zakłada się istotną mobilność węzłów, topologia sieci kopalnianej jest w dużej mierze statyczna – położenia węzłów są z góry określone, a zmiany wynikają głównie z:

- awarii czujników lub modułów komunikacyjnych,
- konieczności wymiany baterii,
- lokalnych modyfikacji infrastruktury.

Równocześnie środowisko pracy charakteryzuje się:

- wysokim poziomem zapylenia i zmiennymi warunkami propagacji fal radiowych,
- obecnością atmosfer potencjalnie wybuchowych (metan, pył węglowy),
- utrudnionym dostępem serwisowym oraz wymaganiami dyrektywy ATEX [16, 77, 78, 81].

W takich warunkach algorytm trasowania powinien zapewniać:

- wysoką pewność dostarczenia danych (Packet Delivery Ratio, PDR),
- kontrolowany poziom opóźnień end-to-end,
- efektywne gospodarowanie energią węzłów,
- odporność na lokalne zakłócenia transmisji i uszkodzenia pojedynczych elementów.

W kolejnych podrozdziałach przedstawiono najważniejsze grupy algorytmów trasowania oraz wyniki badań symulacyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem rozwiązań, które mogą zostać zastosowane w sieciach sensorycznych dedykowanych monitorowaniu sekcji obudowy zmechanizowanej.

3.2 Klasyczne podejścia do trasowania w sieciach sensorycznych

3.2.1 Podział algorytmów trasowania – poziomy i struktury

Podstawowy podział algorytmów trasowania w WSN obejmuje rozwiązania:

- płaskie – wszystkie węzły mają zasadniczo równorzędny status,
- hierarchiczne (klastrowe) – wyróżnia się węzły pełniące rolę głowic klastrow i węzły zwykłe.

W podejściu płaskim jednym z klasycznych rozwiązań jest ukierunkowana dyfuzja (ang. *Directed Diffusion*). Dane są tu opisywane w formie par atrybut–wartość, a węzły rozprzestrzeniają „zainteresowanie” danym typem informacji. Ścieżki, którymi płyną pakiety spełniające kryteria zapytania, są następnie wzmacniane, co prowadzi do naturalnego ustalenia trasy o korzystnych parametrach [11].

Inny algorytm płaski – Rumor Routing – jest modyfikacją dyfuzji ukierunkowanej, przydatną tam, gdzie trasowanie geograficzne jest utrudnione. Po wykryciu zdarzenia generowany jest komunikat o zdarzeniu („plotka”), który rozprzestrzenia się losowo między węzłami. Jeśli inny węzeł potrzebuje informacji o zdarzeniu, wysła zapytanie, które – również rozgłaszane losowo – ma szansę „przebiec się” z trasą plotki, co umożliwia dotarcie do źródła [6].

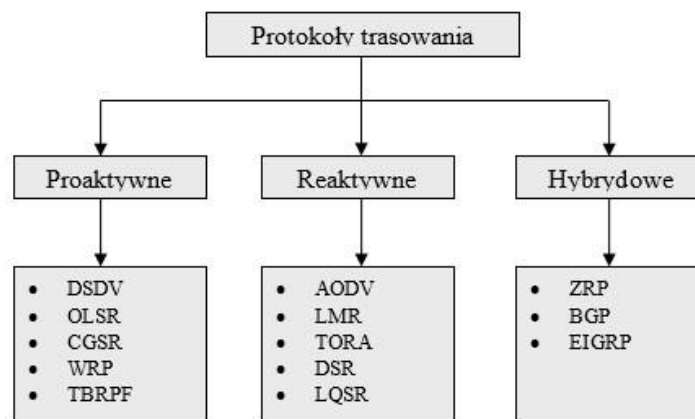
W podejściu hierarchicznym sieć dzieli się na klastry, a wybrane węzły przyjmują rolę głowic klastrow (CH). Klasycznym przykładem jest LEACH (ang. *Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*), w którym węzły są losowo wybierane na CH, a funkcja ta rotuje w czasie, co pozwala równomiernie rozłożyć zużycie energii [21].

Rozwinięciem tej koncepcji jest m.in. PEGASIS (ang. *Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems*), w którym zamiast klastrow buduje się łańcuch węzłów – każdy komunikuje się tylko z najbliższym sąsiadem, a dane stopniowo przekazywane są w kierunku stacji bazowej [46].

3.2.2 Protokoły proaktywne, reaktywne i hybrydowe

Płaskie algorytmy trasowania można usystematyzować, dzieląc je na trzy główne grupy (rys. 16):

- protokoły proaktywne,
- protokoły reaktywne,
- rozwiązania hybrydowe.



Rys. 16. Podział algorytmów trasowania ścieżek w sieciach sensorycznych [53]

W protokołach proaktywnych każdy węzeł utrzymuje w tzw. tabelach routingu informacje o trasach do pozostałych węzłów sieci. Tablice te są cyklicznie odświeżane, tak aby przechowywane dane odpowiadały aktualnej topologii sieci – utrzymywanie ścieżek odbywa się niezależnie od tego, czy w danej chwili faktycznie trwa transmisja danych. Do tej grupy zalicza się m.in.:

- DSDV (ang. *Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance Vector Routing Protocol*) – protokół trasowania wykorzystujący wektor odległości, oznaczający wpisy w tablicach sekwencjami miejsc docelowych,
- OLSR (ang. *Optimized Link State Routing Protocol*) – zoptymalizowany protokół stanu łącza, w którym wykorzystuje się koncepcję węzłów MPR (*MultiPoint Relays*) w celu ograniczenia liczby retransmisji,

- CGSR (ang. *Cluster Gateway Switch Routing Protocol*) – rozproszony algorytm trasowania z wyborem węzła głównego klastra,
- WRP (ang. *Wireless Routing Protocol*) – protokół trasowania z optymalizacją mechanizmów aktualizacji tablic,
- TBRPF (ang. *Topology Dissemination based on Reverse-Path Forwarding*) – protokół rozpowszechniania informacji o topologii oparty na mechanizmie odwrotnego przesyłania ścieżek,
- QDRP (ang. *Quality of Service – Directional Routing Protocol*) – algorytm kierunkowego trasowania z uwzględnieniem wymagań jakości usług (QoS).

Z kolei protokoły reaktywne uruchamiają mechanizm wyszukiwania trasy dopiero w momencie, gdy węzeł źródłowy potrzebuje przesłać pakiet danych. Pozwala to znacząco ograniczyć liczbę pakietów sterujących w spokojnych okresach pracy sieci, kosztem opóźnień związanych z samą procedurą „odkrywania” ścieżki. Wśród algorytmów reaktywnych wyróżnia się w szczególności:

- AODV (ang. *Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing Protocol*) – protokół trasowania na żądanie z wektorami odległości, szeroko stosowany w sieciach ad hoc,
- LMR (ang. *Label-based Multipath Routing*) – algorytm wielościeżkowego trasowania oparty na etykietach, umożliwiający wyznaczanie kilku tras równocześnie,
- TORA (ang. *Temporally-Ordered Routing Algorithm*) – protokół trasowania, w którym porządek czasowy zdarzeń wykorzystywany jest do utrzymania spójności struktury trasy,
- DSR (ang. *Dynamic Source Routing Protocol*) – algorytm trasowania źródłowego, w którym cała trasa jest zapisywana w nagłówku pakietu,
- LQSR (ang. *Link Quality Source Routing*) – odmiana trasowania źródłowego, w której dodatkowo uwzględnia się jakość poszczególnych łączy.

Trzecią grupę stanowią algorytmy hybrydowe, próbujące połączyć zalety obu podejść. Typowym rozwiązaniem jest podział sieci na mniejsze części (strefy) i utrzymywanie informacji o trasach głównie wewnątrz tych stref, przy

jednoczesnym wyszukiwaniu tras do odleglejszych węzłów w sposób reaktywny. Do najbardziej znanych protokołów hybrydowych należą:

- ZRP (ang. *Zone Routing Protocol*) – protokół trasowania strefowego, w którym zakres „strefy” wyznacza promień sąsiedztwa węzła,
- BGP (ang. *Border Gateway Protocol*) – protokół trasowania brzegowego wykorzystywany do wymiany informacji między domenami,
- EIGRP (ang. *Enhanced Interior Gateway Routing Protocol*) – rozszerzony protokół trasowania wewnątrz systemu autonomicznego, łączący cechy trasowania wektorem odległości i stanu łącza.

Taki podział płaskich algorytmów trasowania (rys. 16) pozwala w sposób uporządkowany zestawić różne strategie zarządzania ruchem w sieci – od rozwiązań utrzymujących pełną informację o topologii, poprzez rozwiązania uruchamiane „na żądanie”, aż po podejścia mieszane, dopasowujące się do rozmiaru i dynamiki sieci.

3.2.3 Hierarchiczne, lokacyjne i wielościeżkowe protokoły trasowania

Obok rozwiązań płaskich w literaturze szeroko opisano hierarchiczne protokoły trasowania, w których węzły organizowane są w klastry, a wybrane z nich pełnią rolę głowic klastrow odpowiedzialnych za agregację i dalszą transmisję danych.

Klasycznym przykładem jest LEACH (ang. Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy). W protokole tym:

- węzły grupowane są w klastry,
- w każdej rundzie pracy sieci wybierana jest głowica klastra (CH),
- węzły członkowskie przesyłają dane do swojej CH, gdzie następuje agregacja i kompresja informacji,
- dopiero z poziomu CH dane trafiają do stacji bazowej.

Takie podejście znacząco redukuje liczbę transmisji na dłuższe odległości i prowadzi do oszczędności energii na poziomie całej sieci [21]. Rozwinięciem idei jest m.in. PEGASIS (ang. Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems), w którym zamiast klastrow tworzony jest łańcuch węzłów sensorowych, a każdy węzeł komunikuje się jedynie z najbliższym sąsiadem.

Dane są przekazywane wzdłuż łańcucha, co dodatkowo zwiększa efektywność energetyczną [46].

Wśród płaskich i hierarchicznych algorytmów trasowania pojawia się także kategoria protokołów lokacyjnych, wykorzystujących informację o położeniu węzłów do podejmowania decyzji o trasowaniu. Przykładowo:

- GAF (ang. *Geographic Adaptive Fidelity*) dzieli obszar sieci na komórki, w których utrzymywana jest minimalna liczba aktywnych węzłów, a pozostałe mogą przechodzić w stan uśpienia – celem jest maksymalizacja efektywności energetycznej poprzez wyłączenie zbędnych węzłów,
- GEAR (ang. *Geographic and Energy Aware Routing*) łączy informację geograficzną z poziomem energii węzła, dobierając trasy w taki sposób, by z jednej strony zbliżać się do celu, z drugiej zaś unikać nadmiernego obciążania węzłów o niskich zasobach energetycznych [72, 73].

Kolejną klasą są protokoły wielościeżkowe, takie jak:

- AOMDV (ang. *Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector*),
- SMR (ang. *Split Multipath Routing*),

które ustanawiają wiele alternatywnych ścieżek pomiędzy węzłami źródłowymi i docelowymi. Takie rozwiązanie zwiększa niezawodność działania sieci – umożliwia przełączanie transmisji na trasę zapasową w razie awarii węzła lub łącza, pozwala także równoważyć ruch i zmniejszać zatory w sieci [45].

W kontekście aplikacji, gdzie istotne są zarówno dane zdarzeniowe, jak i okresowe, istotne znaczenie mają protokoły progowo-hierarchiczne, np.:

- TEEN (ang. *Threshold-sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol*),
- APTEEN (ang. *Adaptive Periodic Threshold-Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol*).

W rozwiązaniach tych węzły grupowane są w klastry, a główce klastrów zarządzają transmisją danych w oparciu o wartości progowe: część danych jest przekazywana natychmiast (gdy wartość pomiaru przekracza ustalony próg), a część przesyłana jest okresowo. Takie hybrydowe podejście umożliwia obsługę danych krytycznych czasowo przy jednoczesnym ograniczeniu liczby transmisji [47, 48].

Ze względu na ograniczenia energetyczne charakterystyczne dla WSN, liczne prace poświęcone są trasowaniu energooszczędnemu. Przykładem są protokoły uwzględniające zasilanie energią słoneczną – decyzje o wyborze trasy uzależnia się w nich od wskaźnika odnawiania energii danego węzła. Węzły o wysokim potencjale odzysku energii (np. panele fotowoltaiczne) mogą częściej pełnić rolę węzłów pośredniczących, co przekłada się na wydłużenie czasu życia sieci [73].

3.2.4 Algorytmy metaheurystyczne w trasowaniu sieci sensorycznych

Alternatywą dla klasycznych protokołów są algorytmy metaheurystyczne, inspirowane procesami i zachowaniami występującymi w naturze [17, 24, 35]. W kontekście trasowania w WSN szczególne znaczenie mają:

- optymalizacja kolonią mrówek ACO (Ant Colony Optimization),
- optymalizacja rojem cząstek PSO (Particle Swarm Optimization),
- algorytmy pszczele, w tym BA (Bee Algorithm) i jego odmiany.

Algorytm ACO został opracowany przez M. Dorigo na podstawie obserwacji sposobu, w jaki mrówki znajdują najkrótszą drogę do źródła pożywienia. Pojedyncza mrówka-zwiadowca porusza się losowo po środowisku, poszukując rozwiązania problemu (w przypadku sieci – korzystnej trasy). Podczas wędrówki każda mrówka pozostawia na podłożu ślad feromonowy, którego intensywność jest zależna od jakości przebytej ścieżki. Inne mrówki odczytują zgromadzony feromon i z większym prawdopodobieństwem wybierają trasy o wyższym stężeniu. Pojedyncza mrówka może znaleźć rozwiązanie przeciętnej jakości, jednak wysokiej jakości rozwiązania są efektem współpracy całej kolonii, która wzmacnia najlepsze ścieżki i wygasza te mniej korzystne. W sieciach WSN przenosi się tę ideę na poziom wirtualnych „mrówek-pakietów” eksplorujących sieć i aktualizujących wagi tras [24].

Algorytm PSO (ang. Particle Swarm Optimization), opracowany przez Kennedy’ego i Eberharta [6], jest stochastycznym algorytmem optymalizacyjnym, inspirowanym zachowaniem rojów zwierząt (stada ptaków, ławice ryb). Każda cząstka w roju ma przypisane:

- położenie w przestrzeni poszukiwań (np. zakodowaną trasę),
- prędkość,
- kierunek ruchu.

Parametry te są aktualizowane na podstawie najlepszych dotychczasowych doświadczeń cząstki (tzw. optimum lokalne) oraz najlepszych doświadczeń jej sąsiadów (optimum globalne). Dzięki temu równoważona jest eksploracja (poszukiwanie nowych rozwiązań) i eksploatacja (udoskonalanie już znalezionych). W zastosowaniu do trasowania w WSN każda cząstka może reprezentować potencjalną trasę, a funkcja celu obejmuje np. długość ścieżki, zużycie energii, PDR czy opóźnienie [9, 52, 42, 44].

Z kolei algorytm pszczele BA (Bee Algorithm) bazuje na obserwacji zachowania roju pszczoł podczas poszukiwania i eksploatacji źródeł pożywienia. W modelu z ula wysyłane są pszczoły zwiadowcze, które losowo przeszukują teren. Po powrocie przekazują informacje o kierunku, odległości i jakości znalezionej pokarmu w postaci tzw. tańca pszczoł. Na podstawie tych informacji kolonia podejmuje decyzję, ile pszczoł-robotnic wysłać do danego źródła – im wyższa jakość pożywienia i korzystniejszy koszt dotarcia, tym więcej robotnic. W trakcie zbierania pokarmu robotnice aktualizują informacje o zasobności źródła i po powrocie do ula korygują wcześniejsze oceny.

W zastosowaniu do trasowania w WSN poszczególne „źródła pokarmu” odpowiadają kandydackim trasom, a liczba robotnic przypisana do danej trasy odzwierciedla jej bieżącą ocenę. W efekcie sieć stopniowo koncentruje się na najkorzystniejszych trasach, zachowując jednocześnie pewien poziom eksploracji przestrzeni rozwiązań [9].

Algorytmy metaheurystyczne – ACO, PSO, BA – odgrywają istotną rolę w dalszej części pracy, ponieważ stanowią punkt wyjścia do projektowania algorytmu trasowania dedykowanego sieci sensorycznej monitorującej sekcje obudowy zmechanizowanej. Ich cechą wspólną jest możliwość uwzględniania wielu kryteriów (energia, PDR, opóźnienie, przepustowość) przy relatywnie prostej implementacji na węzłach o ograniczonych zasobach – co jest szczególnie istotne w warunkach kopalnianych.

3.3 Testy symulacyjne algorytmów trasowania – przegląd wyników badań

W niniejszym podrozdziale przedstawiono przegląd opublikowanych wyników badań symulacyjnych dotyczących algorytmów trasowania stosowanych w sieciach bezprzewodowych, w tym w sieciach sensorowych. Analizowane prace obejmują zarówno klasyczne protokoły reaktywne i proaktywne, jak i rozwiązania oparte na inteligencji roju (ang. Swarm

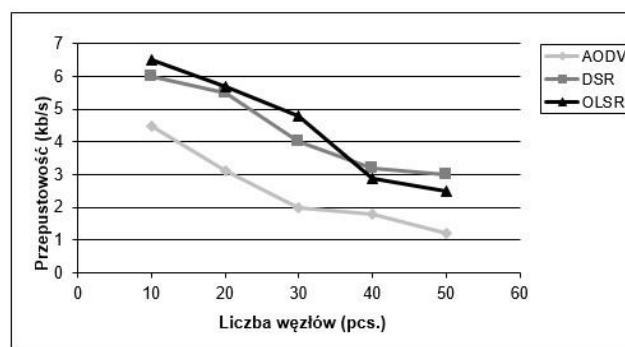
Intelligence, SI). Celem przeglądu jest wskazanie trendów oraz ograniczeń tych podejść w kontekście projektowania algorytmu trasowania dla sieci monitorującej sekcje obudowy zmechanizowanej.

3.3.1 Protokoły reaktywne i proaktywne – wyniki symulacji

W pierwszym etapie analizy literaturowej rozpatrzono wyniki badań symulacyjnych wybranych protokołów reaktywnych i proaktywnych, w szczególności AODV, DSR oraz OLSR, przedstawione w pracy [43]. Autorzy oceniali wydajność tych protokołów w różnych warunkach pracy sieci, przy zmiennych parametrach topologii i mobilności węzłów.

Symulacje przeprowadzono w środowisku OPNET Modeler. Podstawowe parametry obejmowały: liczbę węzłów, obszar działania sieci, czas trwania symulacji oraz prędkość ruchu węzłów. Liczbę węzłów zmieniano w przedziale 10–50, a obszar, na którym rozmieszczono węzły, miał rozmiar od 0 do 1000 m.

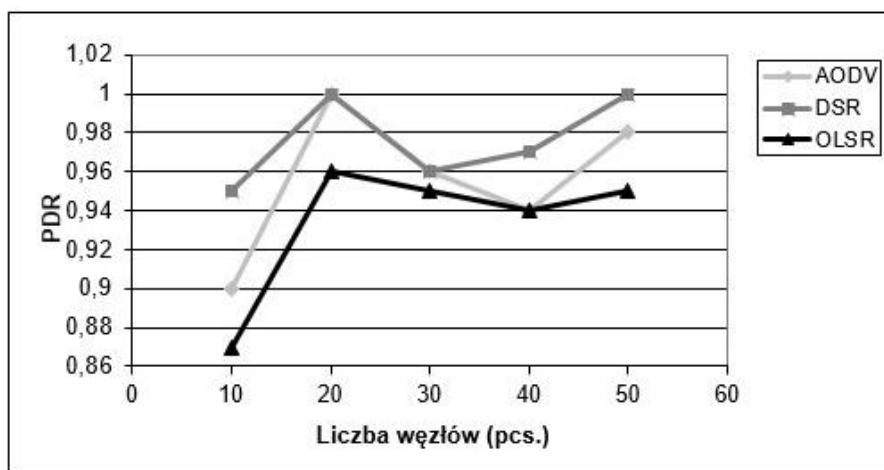
Na rysunku 17 przedstawiono zależność przepustowości sieci od liczby węzłów dla protokołów OLSR, DSR oraz AODV. Z uzyskanych wyników wynika, że wraz ze wzrostem liczby węzłów przepustowość transmisji danych systematycznie spada. Związane jest to m.in. ze zwiększonym natężeniem kolizji w medium radiowym oraz z rosnącym obciążeniem węzłów pośredniczących. Najlepsze wartości przepustowości uzyskano dla sieci z zaimplementowanym protokołem DSR [43].



Rys. 17. Zależność przepustowości algorytmów OLSR, DSR oraz AODV od liczby węzłów sieci sensorycznej [43]

Kolejnym parametrem powszechnie analizowanym w badaniach symulacyjnych jest współczynnik PDR (ang. Packet Delivery Ratio), określający

skuteczność dostarczania pakietów danych do odbiorcy. Na rysunku 18 zaprezentowano zależność PDR od liczby węzłów w sieci dla protokołów OLSR, DSR oraz AODV [43]. W miarę wzrostu liczby węzłów wszystkie trzy protokoły wykazują niestabilność wartości PDR, jednak DSR i OLSR utrzymują bardziej stabilny poziom dostarczania pakietów niż AODV. W artykule [43] wskazano, że pod względem narzutu, opóźnienia oraz przepustowości protokół OLSR wypada korzystniej niż pozostałe analizowane rozwiązania, choć przy większej liczbie węzłów parametry wszystkich protokołów ulegają wyraźnemu pogorszeniu.



Rys. 18. Protokoły OLSR, DSR oraz AODV. Porównanie współczynnika PDR w zależności od liczby węzłów w sieci [43]

W innych opracowaniach [58, 61, 27, 63] analizowano m.in. działanie protokołów DSDV oraz AODV. Wykazano, że klasyczne algorytmy proaktywne i reaktywne cechują się relatywnie dobrą skutecznością w sieciach o niewielkiej liczbie węzłów (rzędu kilkunastu–kilkudziesięciu) oraz statycznej lub mało dynamicznej topologii. Symulacje przeprowadzone dla sieci składającej się z 50 węzłów pokazują, że wraz ze wzrostem prędkości przemieszczania się węzłów przepustowość transmisji wyraźnie spada. Wzrost liczby węzłów oraz mobilności prowadzi do zwiększonego narzutu sygnalizacyjnego, a tym samym do pogorszenia kluczowych parametrów jakościowych (PDR, opóźnienie, przepustowość).

Ograniczenia te stanowią jedną z głównych przyczyn zainteresowania algorytmami trasowania opartymi na inteligencji roju, które mają lepiej skalować się wraz ze wzrostem liczby węzłów oraz lepiej adaptować się do zmian topologii.

3.3.2 Algorytm mrówkowy AntHocNet

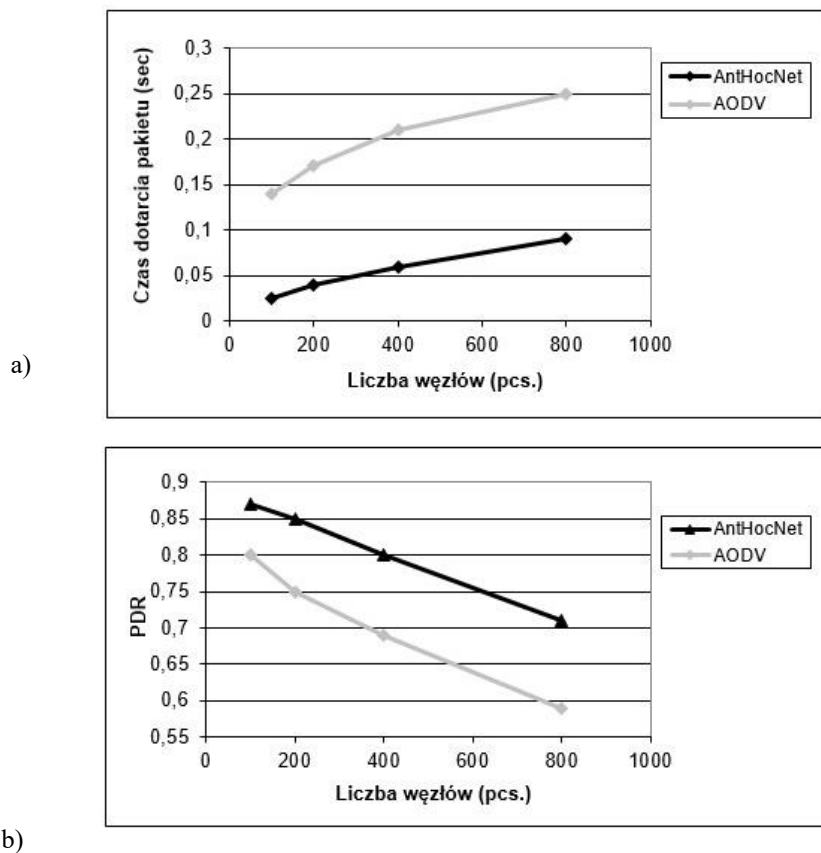
Jednym z reprezentatywnych rozwiązań opartych na inteligencji roju jest protokół AntHocNet, zbudowany w oparciu o algorytm mrówkowy ACO (Ant Colony Optimization). W pracy [13] zaprezentowano wyniki symulacji porównujących działanie AntHocNet z klasycznym protokołem reaktywnym AODV. Analizy przeprowadzono dla różnych scenariuszy sieciowych, zróżnicowanych pod względem poziomu mobilności, gęstości węzłów oraz rozmiarów sieci.

Na rysunku 19 przedstawiono:

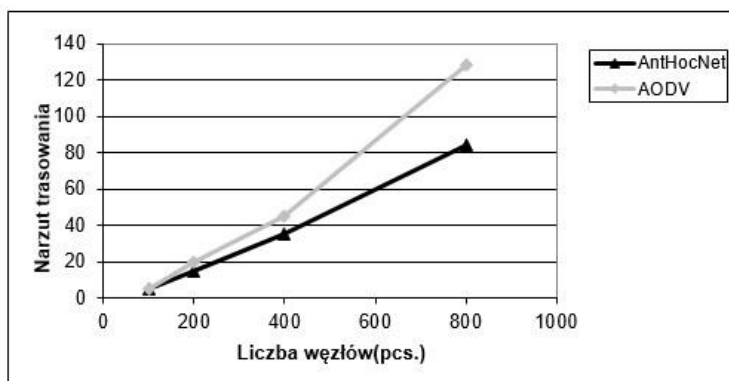
- zależność czasu dotarcia pakietu do miejsca docelowego od liczby węzłów (rys. 19a),
- zależność współczynnika PDR od liczby węzłów (rys. 19b).

Wyniki pokazują, że AntHocNet charakteryzuje się krótszym czasem dostarczenia pakietów do punktu docelowego (rys. 19a) oraz wyższymi wartościami PDR w całym badanym zakresie liczby węzłów w sieci (rys. 19b) niż AODV [13].

Na rysunku 20 zaprezentowano liczbę pakietów sterujących generowanych przez oba protokoły. Wraz ze wzrostem liczby węzłów liczba pakietów sygnalizacyjnych wymaganych przez AODV rośnie znacząco. AntHocNet, mimo dodatkowego ruchu związanego z „mrówkami” eksplorującymi sieć, okazuje się rozwiązaniem o lepszej skalowalności pod względem narzutu sterującego i wydajności [13].



Rys. 19. Algorytmy AODV oraz AntHocNet a) zależność czasu dotarcia pakietu oraz b) współczynnika PDR od liczby węzłów w sieci [13]



Rys. 20. Protokoły AODV oraz AntHocNet [13]

3.3.3 Algorytmy PSO: SSKIR i MPSORP

Kolejną grupę rozwiązań stanowią algorytmy trasowania oparte na optymalizacji rojem cząstek PSO (Particle Swarm Optimization).

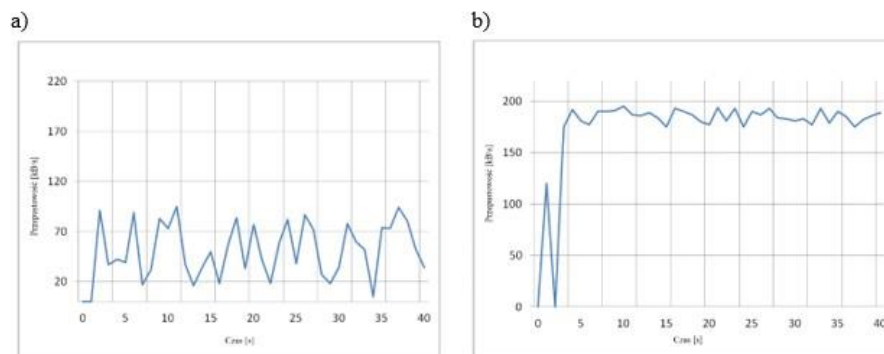
Porównano klasyczny protokół reaktywny AODV z algorytmem SSKIR, który wykorzystuje PSO do wyznaczania tras. Symulacje przeprowadzono m.in. dla sieci złożonej z 500 węzłów [60].

Na rysunku 21 przedstawiono przebiegi przepustowości sieci w czasie:

- dla protokołu AODV (rys. 21a),
- dla algorytmu SSKIR (rys. 21b).

Dla algorytmu SSKIR przepustowość utrzymuje się na poziomie około 200 kB/s, natomiast w przypadku AODV obserwuje się znaczną niestabilność przepływu danych i niższą średnią przepustowość, oscylującą wokół 95 kB/s [60].

Wyniki te wskazują, że zastosowanie PSO w procesie trasowania pozwala efektywniej wykorzystać zasoby sieciowe, zwłaszcza w sieciach o dużej liczbie węzłów.

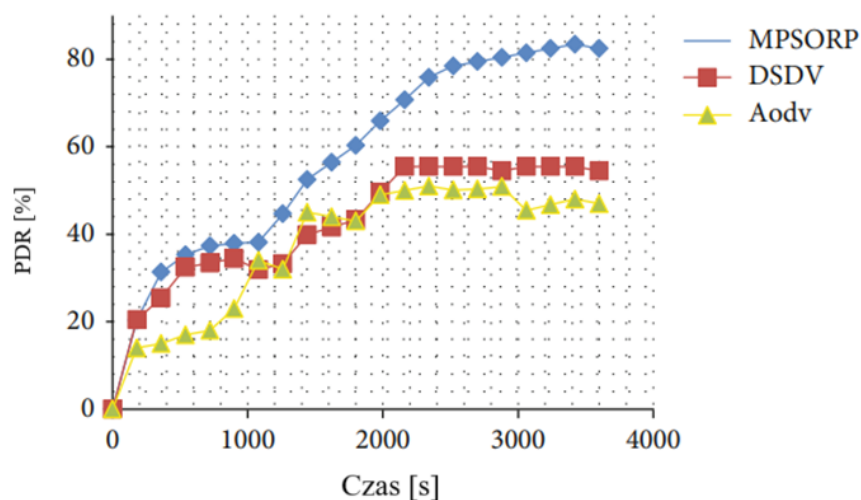


Rys. 21. Protokoły a) AODV oraz b) SSKIR zależność przepustowości sieci w czasie [60]

Zaproponowano natomiast algorytm MPSORP, również oparty na PSO. Symulacje przeprowadzono w środowisku NS-2, w systemie Linux Ubuntu, dla sieci liczącej 25 węzłów rozmieszczonych na obszarze o wymiarach 500×500 m.

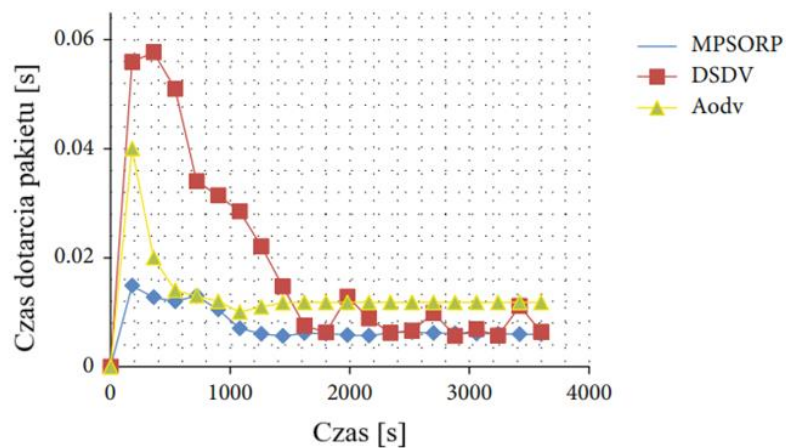
Analizowane prędkości ruchu węzłów mieściły się w zakresie od 0,006 m/s do 0,47 m/s [18].

Na rysunku 22 przedstawiono wartości współczynnika PDR dla MPSORP, DSDV oraz AODV. Algorytm MPSORP osiąga maksymalną wartość PDR na poziomie około 83%, co przewyższa wyniki uzyskane dla klasycznych protokołów [18].



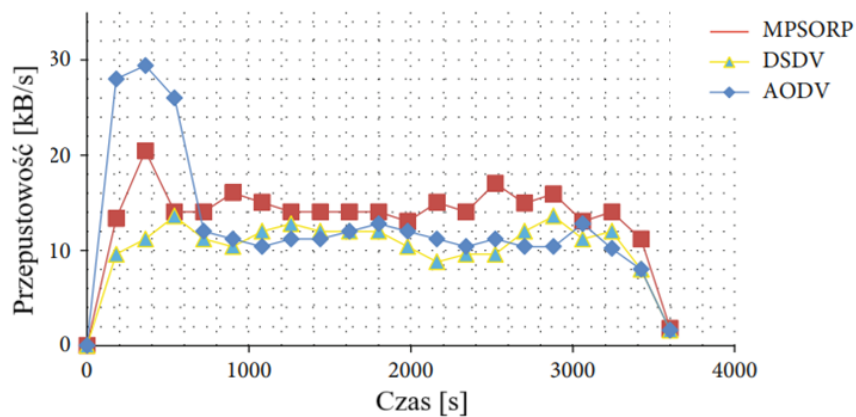
Rys. 22. Ocena współczynnika PDR (wyznaczona na bazie symulacji) w odniesieniu do algorytmów MPSORP, DSDV, AODV [18]

Na rysunku 23 zobrazowano czas dotarcia pakietu do miejsca docelowego. MPSORP zapewnia niższe opóźnienia end-to-end (rzędu 0,045 s) niż DSDV i AODV, co czyni go bardziej odpowiednim do zastosowań wrażliwych na czas reakcji sieci [18].



Rys. 23. Czas dotarcia pakietu do miejsca docelowego przy zastosowaniu algorytmów MPSORP, DSDV, AODV [18]

Na rysunku 24 zestawiono przepustowość sieci dla tych samych protokołów. Protokół MPSORP utrzymuje wyższą i bardziej stabilną przepustowość niezależnie od analizowanego zakresu mobilności węzłów, osiągając najlepsze wyniki przy różnych prędkościach ruchu [18].

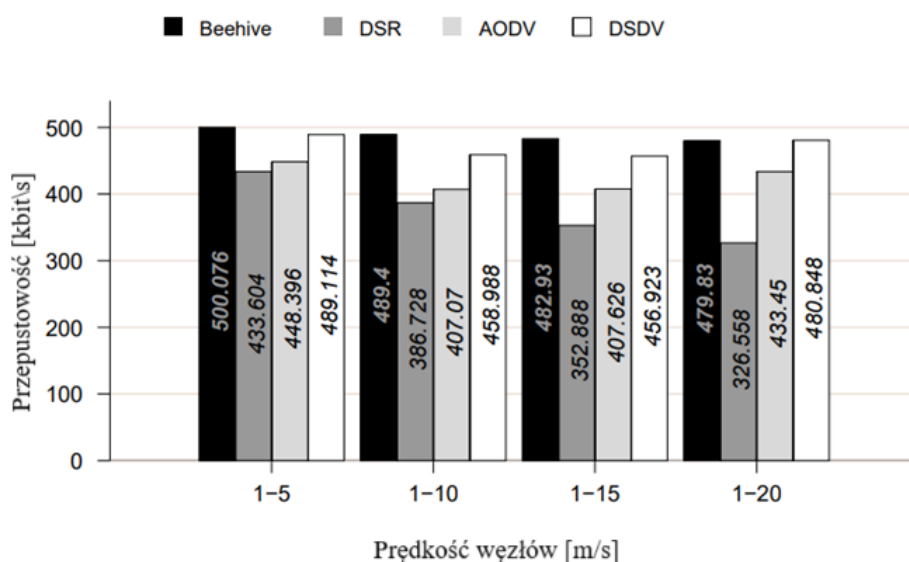


Rys. 24. Przepustowość sieci przy zastosowaniu algorytmów MPSORP, DSDV, AODV [18]

3.3.4 Algorytmy pszczele – Beehive

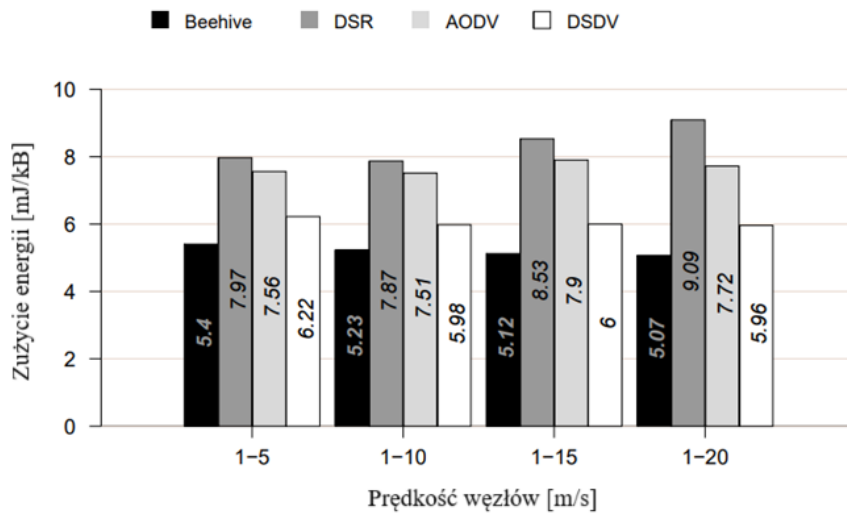
W referacie przeanalizowano algorytm pszczeli Beehive, bazujący na koncepcji algorytmu BA (Bee Algorithm), w porównaniu z dwoma protokołami reaktywnymi – DSR i AODV – oraz protokołem proaktywnym DSDV. Symulacje przeprowadzono dla sieci złożonej z 50 węzłów, poruszających się ze zmienną prędkością (w czterech przedziałach) na obszarze o wymiarach 2400×800 m [71].

Na rysunku 25 przedstawiono porównanie przepustowości uzyskanej przez poszczególne protokoły. Najwyższą przepustowość osiągnął algorytm Beehive [71].



Rys. 25. Porównanie przepustowości algorytmów Beehive, DSR, AODV, DSDV [71]

Na rysunku 26 zaprezentowano zestawienie zużycia energii dla analizowanych algorytmów. Beehive charakteryzuje się najmniejszym zużyciem energii w porównaniu z DSR, AODV i DSDV [71]. Oznacza to, że algorytm pszczeli pozwala jednocześnie poprawić przepustowość oraz zredukować zużycie energii, co ma kluczowe znaczenie w sieciach zasilanych bateryjnie.



Rys. 26. Zestawienie zużycia energii algorytmów Beehive, DSR, AODV, DSDV [71]

3.3.5 Podsumowanie wyników badań symulacyjnych

Przegląd dostępnych w literaturze wyników badań symulacyjnych jednoznacznie wskazuje, że zastosowanie algorytmów trasowania opartych na inteligencji roju (SI – ang. Swarm Intelligence) wpływa korzystnie na parametry pracy bezprzewodowych sieci sensorycznych. W porównaniu ze standardowymi protokołami trasowania typu reaktywnego i proaktywnego algorytmy te pozwalają zazwyczaj:

- ustabilizować i zwiększyć przepustowość sieci,
- zwiększyć wartość współczynnika PDR,
- ograniczyć opóźnienie end-to-end,
- lepiej zarządzać energią węzłów, zwłaszcza w większych i bardziej złożonych topologiach.

Należy jednak podkreślić, że wszystkie przedstawione w literaturze wyniki mają charakter symulacyjny – zostały uzyskane w środowiskach takich jak OPNET czy NS-2, przy określonych założeniach modelowych. Z punktu widzenia praktycznego wdrożenia w sieciach monitorujących sekcje obudowy zmechanizowanej oznacza to konieczność przejścia do kolejnego etapu badań, obejmującego:

- implementację wybranych klas algorytmów trasowania w rzeczywistych węzłach sieci,
- przeprowadzenie testów eksperymentalnych w warunkach jak najbardziej zbliżonych do rzeczywistych warunków kopalnianych,
- weryfikację zgodności wyników symulacyjnych z zachowaniem sieci w praktyce.

Dodatkowym, kluczowym ograniczeniem praktycznym jest fakt, że sieć sensoryczna rozważana w niniejszej pracy ma pracować w strefach zagrożonych wybuchem, a więc wszystkie elementy sprzętowe muszą spełniać wymagania dyrektywy ATEX oraz norm z nią zharmonizowanych [77, 78, 81]. W szczególności pojedynczy węzeł sieci sensorycznej powinien:

- spełniać wymagania dotyczące konstrukcji iskrobezpiecznej,
- zapewniać ograniczenie mocy wypromieniowywanej przez antenę nadawczo–odbiorczą do poziomu dopuszczalnego w danej strefie,
- wykorzystywać układ radiowy w wykonaniu niskoenergetycznym, oparty na zasilaniu bateryjnym,
- zachowywać wymaganą niezawodność pracy w środowisku o niekorzystnym wpływie na elektronikę (zapylenie, wilgotność, zmienne warunki termiczne).

Oznacza to, że wybór i projektowanie algorytmu trasowania nie może być rozpatrywane wyłącznie z perspektywy czysto „sieciowej” – musi być ściśle powiązane z przyjętą architekturą sprzętową węzłów oraz ograniczeniami wynikającymi z przepisów bezpieczeństwa przeciwwybuchowego.

Na podstawie przeprowadzonego badania stanu wiedzy zdefiniowano zestaw kryteriów optymalizacji trasy pakietów danych w sieci sensorycznej, który zestawiono w tabeli 3.

Zestawienie kryteriów doboru najkorzystniejszej drogi wysyłanego pakietu danych

Tabela 3.

Lp.	Kryterium [jednostka]	Opis kryterium
1	Przepustowość sieci [kB/s]	Zwana też prędkością danych, jest to ilość danych przesyłana w sieci na sekundę
2	Czas dotarcia pakietu do miejsca docelowego [ms]	Czas mierzony w milisekundach od momentu wysłania danych z węzła źródłowego do momentu dotarcia danych do węzła docelowego
3	Oszczędność energii [mJ/kB]	Ilość energii zużywana przez węzeł sieci podczas transmisji 1kB danych
4	Pewność dostarczenia danych do miejsca docelowego [%]	Określana jako PDR (ang. Packet Deliver Ratio), stosunek liczby pakietów wysłanych do odebranych

W procesie definiowania powyższych kryteriów uwzględniono zarówno założenia związane z algorytmiką i właściwościami sieci, jak i uwarunkowania sprzętowe:

- perspektywa algorytmów i sieci – obejmująca przepustowość, czas dotarcia pakietu do miejsca docelowego, efektywność energetyczną transmisji oraz pewność dostarczenia danych,
- perspektywa sprzętowa – odnosząca się do dostępnych rozwiązań rynkowych (czujniki, moduły radiowe, układy zasilania), które muszą z jednej strony pozwalać na realizację założonych mechanizmów sieciowych, z drugiej zaś zapewniać wymaganą niezawodność pracy w środowisku kopalnianym oraz zgodność z wymaganiami dyrektywy ATEX [77, 78, 81].

Zdefiniowany zbiór kryteriów uznano za wystarczający i kompletny z punktu widzenia praktycznej eksploatacji projektowanej sieci sensorycznej w warunkach rzeczywistych. Kryteria te stanowią jednocześnie podstawę późniejszej oceny i porównania wariantów algorytmów trasowania oraz wyznaczania najkorzystniejszych tras przepływu danych w sieci monitorującej sekcje obudowy zmechanizowanej.

4. Projekt algorytmu trasowania

Sieć sensoryczna monitorująca parametry pracy sekcji obudowy zmechanizowanej w kompleksie ścianowym stanowi kluczowy element nowoczesnych systemów diagnostycznych. Sensory montowane na sekcjach obudowy to przede wszystkim inklinometry, czujniki ciśnienia oleju w stojakach hydraulicznych oraz moduły pomiaru odległości od czoła ściany [28, 70]. Dane pozyskiwane z tych urządzeń muszą zostać niezawodnie przesłane do nadrzędnych systemów rejestracji i analizy, zlokalizowanych w rejonie komputera ścianowego, a następnie – do systemów powierzchniowych.

W niniejszym rozdziale zaprojektowano i opisano algorytm trasowania dedykowany do sieci sensorycznej pracującej w środowisku kompleksu ścianowego. Algorytm ten uwzględnia zarówno specyfikę struktury sieci (topologia, liczba węzłów, sposób ich rozmieszczenia), jak i ograniczenia wynikające z warunków środowiskowych (ATEX, zasilanie bateryjne, ograniczona moc obliczeniowa węzłów).

4.1 Założenia projektowe i kryteria optymalizacji

Konstrukcja czujników (węzłów sieci) zainstalowanych na kompleksie ścianowym musi spełniać wymagania dyrektywy ATEX [77, 78, 81], w zakresie grupy I, kategorii M1 urządzeń z poziomem bezpieczeństwa "ia". Obudowa węzłów powinna spełniać wymogi odpowiedniej wartości rezystancji powierzchniowej oraz wytrzymałości mechanicznej (parametry zostały szczegółowo omówione w rozdziale 7).

Obwody elektryczne węzła muszą spełniać wymogi dyrektywy ATEX, przy zachowaniu warunku ograniczenia mocy generowanej z nadajnika radiowego oraz zabezpieczenia odpowiedniego poziomu zasilania baterijnego. Zaprojektowany algorytm trasowania powinien zapewniać adaptację również w procesie projektu konkretnej sieci sensorycznej. W ocenie algorytmu przyjęto następujące kryteria:

- czas dotarcia pakietu do celu - wybór trasy pakietu danych, która będzie najkrótszą ścieżką do punktu dostępowego. Dzięki optymalizacji według opisanego kryterium możliwe będzie zwiększenie czasu próbkowania takiej sieci bez konieczności buforowania danych. Zakłada się, że w węzłach zostaną zainstalowane proste mikrokontrolery (o małej pojemności pamięci wewnętrznej), ze względu na potrzebę niskiego zużycia energii. Zwiększenie wartości częstotliwości jest konieczne ze

względu na potrzebę rejestrowania dodatkowych zjawisk (takich jak obwały i zawały skał), możliwość wczesnego wykrywania, przewidywania, a tym samym późniejszego przeciwdziałania,

- przepustowość sieci, szybkość transmisji danych – wymagane jest również, aby sieć była w stanie przesyłać jak najwięcej danych w jednym pakiecie, wykorzystując przy tym maksymalną dostępną przepustowość modułów radiowych,
- zużycie energii - minimalizacja zużycia energii w celu zrekompensowania strat przez elektryczne urządzenia zabezpieczające zwiększające zapotrzebowanie energetyczne (zastosowanie dodatkowej rezystancji w celu zmniejszenia natężenia prądu powoduje, że energia baterii rozprasza się w postaci ciepła); minimalizacja zużycia energii wpływa również na możliwość zastosowania baterii o mniejszych rozmiarach, co minimalizuje rozmiar obudowy zmniejszając jednocześnie powierzchnię na której mogą gromadzić się ładunki elektrostatyczne,
- współczynnik dostarczania pakietów - niezawodność działania; potwierdzenie, że zmierzone dane docierają do odbiorcy i nie są tracone. Brak buforowania danych, ze względu na ograniczoną pamięć wewnętrzną, wymusza zastosowanie algorytmu o wysokiej niezawodności w dostarczaniu danych do miejsca docelowego (protokoły nie mają zaimplementowanych mechanizmów potwierdzania transmisji). Dzięki takiemu podejściu węzły nie będą musiały retransmitować utraconych pakietów danych, co wpłynie na minimalizację zużycia energii własnej.

W wyniku przeprowadzonej analizy literaturowej, badań wstępnych oraz doświadczeń własnych zaproponowano implementację do modelu sieci sensorycznej dwóch typów rozwiązań wybranych na etapie analizy symulacji (rozdz. 3) algorytmów bazowych oraz spełniających kryteria wstępne w zakresie charakterystyki węzłów.

4.1.1 Algorytm optymalizacji rojem cząstek

W odniesieniu do zmodyfikowanego algorytmu optymalizacji rojem cząstek zaimplementowanego w modelu sieci sensorycznej zdefiniowano zbiór założeń umożliwiających jego poprawne funkcjonowanie.

Określenie każdej cząstki P_i w algorytmie, następuje zgodnie z następującą zależnością:

$$P_i = [X_{i,1}, X_{i,2}, X_{i,3}, \dots, X_{i,D}] \quad (1)$$

gdzie:

D - wymiar przestrzeni, w której znajdują się cząstki (w rozpatrywanej implementacji równy liczbie węzłów w sieci sensorycznej); Cząstka umieszczona jest w przestrzeni, której położenie określa odległość od każdego z węzłów sieci,

i - i -ta cząstka,

X_i - położenie i -tej cząstki w D wymiarowej- przestrzeni,

Estymację wartości prędkości i położenia każdej z cząstek sieci sensorycznej wyznacza się zgodnie z wzorami:

$$V_k^i = w \cdot V_{k-1}^i + c_1 \cdot r_1 \cdot (P_{best}^i - X_{k-1}^i) \Delta t + c_2 \cdot r_2 \cdot (G_{best} - X_{k-1}^i) \Delta t \quad (2)$$

$$X_k^i = X_{k-1}^i + \frac{V_{k-1}^i}{\Delta t} \quad (3)$$

gdzie:

w - parametr determinujący wpływ poprzedniego położenia cząstki na jej bieżącą pozycję,

k - k -ty krok algorytmu,

V_k^i - bieżąca prędkość i -tej cząstki w k -tym kroku algorytmu,

X_k^i - bieżące położenie i -tej cząstki w k -tym kroku algorytmu,

c_1, c_2 - parametry skalujące,

r_1, r_2 - liczby losowe,

P_{best}^i - najlepiej dopasowane do kryterium rozwiązanie lokalne,

G_{best} - najlepiej dopasowane do kryterium rozwiązanie globalne,

Δt - czas.

W pierwszym kroku działania algorytmu wartości poprzedniego położenia i prędkości oraz najlepiej dopasowane do kryteriów rozwiązania (lokalne oraz globalne) wyznaczone są losowo z przedziału $(0, 1)$. Każda cząstka stanowi rozwiązanie, w rozważanym przypadku wynikiem działania algorytmu jest droga od węzła typu NODE do węzła typu SINK.

Do rozwiązania dąży się w sposób optymalny (zgodnie z założonymi kryteriami) używając do tego funkcji celu F_{dest} :

$$F_{dest} = w_1 \cdot RSSI + w_2 \cdot \frac{1}{HopToSink} + w_3 \cdot B_{state} \quad (4)$$

gdzie:

w_1, w_2, w_3 - wagi poszczególnych kryteriów mieszczące się w przedziale $(0, 1)$

$RSSI$ - moc sygnału nadajnika radiowego sąsiedniego węzła,

B_{state} - stan naładowania baterii sąsiedniego węzła,

$HopToSink$ - liczba skoków (przejsć pomiędzy węzłami typu NODE) do węzła typu SINK.

Współczynniki wagowe przyjęte są w tym zakresie, aby jednoznacznie określać znaczenia poszczególnych czynników funkcji celu. Takie podejście zwiększa przejrzystość interpretacyjną i ułatwia kalibrację algorytmu. Dodatkowo współczynniki wagowe w algorytmie PSO wpływają na równowagę między eksploracją (globalne przeszukiwanie przestrzeni rozwiązań) oraz eksploatacją (lokalne doprecyzowanie rozwiązań). Wartości z zakresu bliskiego 0 (ale nie równe 0) pozwalają uniknąć sytuacji, w której dana cecha całkowicie zanika w procesie optymalizacji, zachowując jednocześnie jej istotność na minimalnym poziomie. Górna granica zakresu równa 1 pozwala maksymalnie wykorzystać wpływ danego kryterium bez zdominowania innych aspektów algorytmu.

Funkcja celu jest używana do wyznaczenia najlepiej dopasowanych rozwiązań (lokalnego oraz globalnego), zgodnie z zależnościami:

$$P_{best} = \begin{cases} P_i, & \text{jeśli } (F_{dest}(P_i) < F_{dest}(P_{best})) \\ P_{best}, & \text{w innym przypadku} \end{cases} \quad (5)$$

$$G_{best} = \begin{cases} P_i, & \text{jeśli } (F_{dest}(P_i) < F_{dest}(G_{best})) \\ G_{best}, & \text{w innym przypadku} \end{cases} \quad (6)$$

Po wyznaczeniu najlepiej dopasowanych do zdefiniowanych kryteriów rozwiązań następuje ponowne wyliczenie położenia i wartości prędkości cząstek. Proces obliczeniowy wykonywany jest w węźle typu SINK, do którego muszą dotrzeć wszystkie informacje niezbędne do przeprowadzenia kolejnych iteracji (natomiast każdy z węzłów typu NODE zbiera informacje o stanie sąsiadów, a następnie przesyła je do węzła typu SINK).

W odniesieniu do wyznaczonej tablicy sąsiadów węzła typu NODE określonej oznaczeniem:

$$N_{wi}[w_x, w_y, w_n] \quad (7)$$

gdzie:

w_x, w_y, w_n - sąsiedzi węzła w_i ,

wyznaczany jest indeks najlepszego sąsiada:

$$n = X_i \cdot L_N \quad (8)$$

gdzie:

X_i - położenie węzła w_i ,

L_N - liczba sąsiadów węzła w_i .

Następnie przy znanym rozwiązaniu, węzeł typu SINK wysyła do węzłów typu NODE informacje na temat wyboru najlepszego sąsiada. Procedura ta jest powtarzana ustaloną liczbę iteracji oraz jest uruchamiana również w trakcie wystąpienia innych losowych lub zdeterminowanych zdarzeń (typu: utrata węzła, nowy węzeł w sieci itp.).

4.1.2 Algorytm mrówkowy

W stosunku do zmodyfikowanego algorytmu ACO (ang. Ant Colony Optimization) implementację w modelu sieci sensorycznej wykonano zgodnie z założeniami obejmującymi aspekt zastosowania sieci sensorycznej.

Węzły typu NODE zbierają informacje o swoich sąsiadach (z pakietów FOLLOW_ME). Z węzłów typu NODE wysyłane są pakiety danych (tzw. mrówki), które pozostawiają w odwiedzionym węźle feromon (inkrementacja odpowiedniej zmiennej) oraz przemieszczają się do sąsiada (wybranego na podstawie funkcji prawdopodobieństwa). Prawdopodobieństwo wyboru węzła j, przez mrówkę znajdującą się w węźle i, przedstawione zostało za pomocą wzoru:

$$p_{ij} = \frac{\tau^\alpha * \varphi^\beta}{\sum_{c_{i,l}} \tau^\alpha * \varphi^\beta} \quad (9)$$

gdzie:

τ - ilość feromonu pozostawionego w poszczególnych węzłach,

φ - wartość lokalnej funkcji kryterium,

l - liczba sąsiadów węzła i ,

α, β - współczynniki pozwalające na dobranie wagi pomiędzy feromonem, a funkcją kryterium.

Wartość lokalnej funkcji kryterium wyznaczana jest na podstawie zależności:

$$\varphi = w_1 * RSSI + w_2 * \frac{1}{H_{to_sink}} + w_3 * B_{state} \quad (10)$$

gdzie:

$RSSI$ - moc sygnału radiowego węzła sąsiada,

H_{to_sink} - liczba skoków do węzła typu SINK węzła sąsiada,

B_{state} - stan naładowania baterii w węźle sąsiada,

w_1, w_2, w_3 - wagi poszczególnych kryteriów mieszczące się w przedziale $(0, 1)$.

Wartość funkcji kryterium zależy od mocy nadajnika sąsiedniego węzła (wyrażonej w postaci wartości parametru $RSSI$), liczby skoków do węzła typu SINK oraz poziomu naładowania baterii sąsiedniego węzła.

W rozważanym przypadku algorytm znajduje ścieżki od węzła źródłowego do węzła typu SINK, tak aby czas ich pokonania był jak najkrótszy. Dodatkowym

założeniem jest wybór (jako sąsiadów) węzłów o wyższym poziomie naładowania baterii.

W przypadku gdy pakiet agenta (tj. mrówki) dotrze do węzła typu SINK, oceniana jest jego ścieżka (na zasadzie porównania do cech ścieżki pozostałych agentów). Spośród wszystkich możliwości wybierane jest rozwiązanie o najlepiej dopasowanej wartości parametru. Po ustalonej liczbie iteracji (tj. liczbie wysłanych agentów) przez węzeł typu SINK rozsyłana jest informacja do wszystkich węzłów typu NODE o wyborze najkorzystniejszej drogi pakietu danych.

W węźle zapamiętywany jest jednocześnie wybrany sąsiad. Mrówka powtarza procedurę wyboru, dopóki nie dotrze do węzła typu SINK. Węzeł typu SINK rozsyła informację o dotarciu pakietu (mrówki) do celu, jakim był on sam. Procedura ta jest powtarzana ustaloną liczbę iteracji oraz jest uruchamiana również w trakcie wystąpienia określonych zdarzeń (np. utrata węzła, nowy węzeł w sieci itp.).

4.1.3 Algorytm pszczeleli

W odniesieniu do implementacji algorytmu pszczelego wprowadzono wytyczne warunkujące jego poprawność działania i spełnienie podstawowych kryteriów środowiska zastosowania.

W sieci rozsyłane są trzy różne typy pakietów danych (BeeScout, BeeForager oraz BeeDancer). Zgodnie z algorytmem pszczelim, pszczoły typu Scout wysyłane są losowo do poszczególnych węzłów sieci. Przy czym zapamiętują one przebytą drogę, zbierają informację na temat poziomu energii poszczególnych węzłów sieci oraz zliczają liczbę skoków do węzła typu NODE. Gdy pszczoły Scout dotrą do celu (tj. węzła typu SINK), z węzła docelowego wysyłane są pszczoły Dancer, które informują wszystkie węzły o ścieżce jaką przebyła pszczoła Scout.

W węźle typu NODE ścieżka przesłana przez pszczołę Dancer jest oceniana zgodnie z wzorem w postaci:

$$P = \frac{w_1 * \sum RSSI + w_2 * \sum B_{state}}{L} \quad (11)$$

gdzie:

w_1, w_2 - wagi poszczególnych kryteriów mieszczące się w przedziale $(0,1>)$,

L – długość ścieżki,

$\sum RSSI$ - suma mocy nadajników radiowych węzłów zawartych w ścieżce,

$\sum B_{state}$ - suma stanu naładowania baterii węzłów zawartych w ścieżce.

Jeśli estymowana wartość kryterium (w odniesieniu do przebytej ścieżki) jest większa niż w obecnie najlepszej ścieżce, wtedy staje się ona najlepszą ścieżką węzła typu NODE. W związku z tym staje się ona wyborem do przemieszczania się następnej pszczoły typu Forager.

Pszczoły typu Forager transmitują dane z węzła źródłowego typu NODE, do węzła docelowego typu SINK (trasą określoną przez pszczoły Dancer). Procedura ta jest powtarzana ustaloną liczbę iteracji oraz jest uruchamiana również w trakcie wystąpienia określonych zdarzeń (np. utrata węzła, nowy węzeł w sieci itp.).

Informacje ze wszystkich typów algorytmów przesyłane były w pakietach danych stosu FruityMESH [92]. Natomiast informacje diagnostyczne z poszczególnych węzłów odbierane były przez aplikację zainstalowaną na komputerze klasy PC.

4.1.4 Metoda realizacji badań

Do celów badań modelu sieci sensorycznej oraz walidacji algorytmów trasowania opartych na inteligencji roju konieczne było przeprowadzenie testów w sieci składającej się z minimum trzech węzłów. Wybór minimalnej liczby węzłów wynika z potrzeby opracowania podstawowego, ale funkcjonalnego modelu sieci, który umożliwiłby weryfikację poprawności działania zaimplementowanych algorytmów w prostym środowisku testowym.

Sieć 3-węzłowa stanowi optymalny kompromis pomiędzy prostotą oraz funkcjonalnością. Umożliwia utworzenie pierwszych ścieżek transmisji danych i podstawowych scenariuszy trasowania, co jest wystarczające, aby

zaobserwować podstawowe zachowania sieci, takie jak przesyłanie danych, tworzenie tras oraz reagowanie na zmiany w topologii.

Wstępna implementacja w sieci 3-węzłowej pozwoli również na łatwiejsze wprowadzenie koniecznych modyfikacji algorytmów przed rozszerzeniem badań na większe, bardziej złożone topologie. Dzięki mniejszej liczbie węzłów, uproszczona topologia umożliwia szybsze testy i analizę działania algorytmu w kontrolowanych warunkach. Tego typu podejście ma na celu zminimalizowanie ryzyka problemów technicznych i błędów, które mogłyby wystąpić na późniejszych etapach w bardziej rozbudowanej sieci.

Wybór 3-węzłowej sieci jest więc niezbędnym krokiem w procesie badawczym, pozwalającym na wstępną weryfikację teoretycznych założeń, sprawdzenie poprawności implementacji oraz przygotowanie gruntu pod późniejsze badania prototypu sieci składającej się z minimum 30 węzłów. Działania w tej mniejszej sieci umożliwią testowanie algorytmów pod kątem kluczowych parametrów, takich jak czas dotarcia pakietu do miejsca docelowego, współczynnika PDR, przepustowość sieci oraz zużycia energii przez węzły. Należy również uzyskać funkcjonalność wysyłania pakietów danych (z każdego węzła) o zmiennej wielkości (wysyłanie pojedynczych pakietów oraz serii).

Podczas procesu przesyłania pakietów danych w sieci założono rejestrację wszystkich parametrów pomiarowych zdefiniowanych w ramach założeń. Zgodnie z planem badań, testy w sieci 3-węzłowej stanowiły etap przygotowawczy przed implementacją algorytmu w większej, bardziej skomplikowanej strukturze sieciowej.

4.2 Koncepcja implementacji algorytmu w prototypie sieci sensorycznej

Po przeprowadzonych procesach projektowania, konfiguracji oraz badaniach wykonanego modelu sieci wybrano algorytm, który został zaimplementowany w badanym prototypie sieci sensorycznej.

W niniejszym rozdziale przedstawiona została postać algorytmu wraz z podaniem sposobu jego implementacji w rozbudowanej sieci. Algorytm został zaimplementowany do sieci składającej się z węzłów typu NODE (węzły realizujące procedurę pomiaru określonych wartości parametrów eksploatacyjnych, a następnie przesyłają te dane do sieci radiowej). Węzły typu NODE mają możliwość wymiany danych pomiędzy sobą.

Dane z każdego węzła typu NODE muszą zostać przesłane do węzła typu SINK (węzeł posiadający większą zdolność połączeniową stanowi bramę sieci).

sensorycznej do innych standardów przesyłania danych). Jako algorytm zaimplementowano optymalizację rojem cząstek PSO z elementami algorytmu mrówkowego ACO.

Algorytm został zaprojektowany zgodnie z przedstawionym opisem implementacji algorytmu optymalizacji rojem cząstek (PSO) w poprzednim rozdziale 4.1.

W zastosowanym rozwiązaniu wprowadzono modyfikację w zakresie wyliczania funkcji celu postaci F_{dest} :

$$F_{dest} = w_1 \cdot RSSI + w_2 \cdot \frac{1}{HopToSink} + w_3 \cdot Pheromon + w_4 \cdot B_{state} \quad (12)$$

gdzie:

w_1, w_2, w_3, w_4 - wagi poszczególnych kryteriów mieszczące się w przedziale $(0, 1)$,

$RSSI$ - moc sygnału nadajnika radiowego sąsiedniego węzła,

B_{state} - stan naładowania baterii sąsiedniego węzła,

$Pheromon$ - ilość feromonu pozostawionego w poszczególnych węzłach,

$HopToSink$ - liczba skoków (przejsć pomiędzy węzłami typu NODE) do węzła typu SINK.

Sposób działania algorytmu przebiega zgodnie z przedstawionym opisem:

I. Etap inicjalizacji:

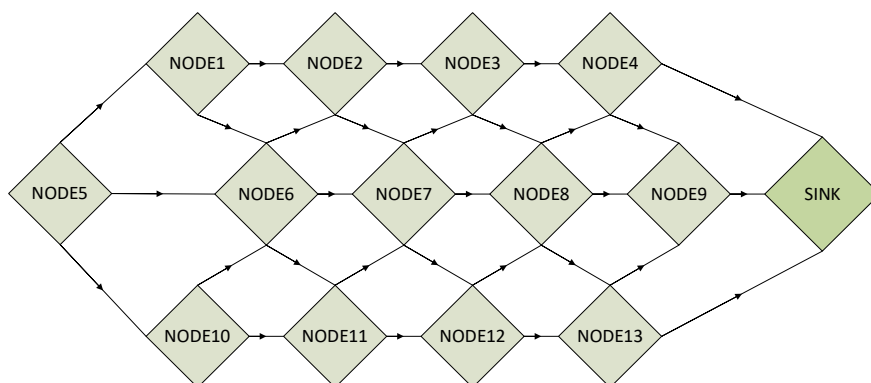
1. Inicjalizacja parametrów algorytmu PSO (takich jak: liczba cząsteczek oraz iteracji, współczynniki wagowe itp.).
2. Inicjalizacja wartości feromonów każdego węzła sieci sensorycznej.
3. Losowa inicjalizacja pozycji cząstki P_i w przestrzeni D-wymiarowej (gdzie: D - liczba węzłów w sieci sensorycznej, i – i-ta cząstka).

II. Wykonanie funkcji programowych w każdej iteracji, aż do osiągnięcia warunku stopu:

1. W odniesieniu do każdej cząsteczki P_i :
 - a) Obliczenie funkcji celu bieżącej pozycji cząsteczki P_i na podstawie odczytanych parametrów sąsiednich węzłów.

- b) Sprawdzenie warunku - jeśli wartość funkcji celu jest niższa od najlepiej dopasowana wartość znaleziona do tej pory, wykonanie aktualizacji bieżącej wartości parametru pozycji cząsteczki.
 - c) Wykonanie aktualizacji wagi feromonów na podstawie algorytmu ACO (w przypadku każdego sąsiedniego węzła z cząsteczką P_i), przy uwzględnieniu przypadków:
 - każdej cząsteczki P_i - aktualizacja prędkości i pozycji cząsteczki zgodnie z równaniami algorytmu PSO,
 - węzła SINK:
 - a. Obliczenie indeksu węzła docelowego każdego węzła sąsiedniego na podstawie liczby jego sąsiadów i pozycji cząsteczki P_i .
 - b. Wybór odpowiedniego sąsiada na podstawie obliczonego indeksu.
 - c. Przekazanie informacji o wybranym sąsiedzie do węzłów NODE, które wysyłają dane do odpowiedniego węzła SINK.
- III. Sprawdzenie warunku stopu - np. osiągnięcie maksymalnej liczby iteracji lub ustalonej wartości funkcji celu. Zwrócenie najlepiej dopasowanej znalezionej pozycji cząsteczki, która odpowiada jednocześnie optymalnej konfiguracji sieci sensorycznej.

W stanie początkowym każdy węzeł typu NODE powinien mieć jasno zdefiniowany zbiór sąsiadów, z którymi możliwe jest nawiązanie połączenia. Na rysunku 27 przedstawiono schemat sieci z węzłami oraz możliwe do wyboru sąsiednie węzły.



Rys. 27. Widok struktury sieci przed iteracją algorytmu

Zestawienie danych odnośnie do możliwych pierwotnych połączeń węzłów z rysunku 27 przedstawiono w tabeli 4. Tabela przedstawia każdy z węzłów wraz z przedstawieniem możliwych do realizacji połączeń z sąsiednimi węzłami.

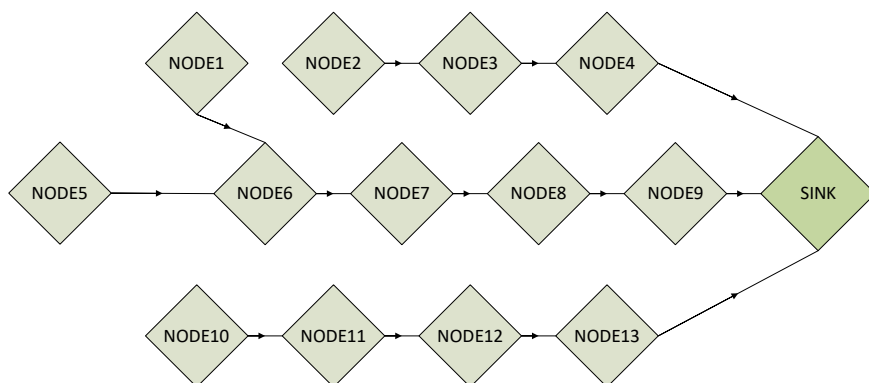
Struktura węzłów przed iteracją algorytmu

Tabela 4.

Lp.	Węzły	Sąsiedni węzeł, z którym możliwe jest połączenie	Liczba możliwych do połączenia węzłów
1	NODE1	(NODE 2, NODE 6)	2
2	NODE 2	(NODE 3, NODE 7)	2
3	NODE 3	(NODE 4, NODE 8)	2
4	NODE 4	(NODE 9, SINK)	2
5	NODE 5	(NODE 1, NODE 6, NODE 10)	3
6	NODE 6	(NODE 2, NODE 7, NODE 11)	3
7	NODE 7	(NODE 3, NODE 8, NODE 12)	3
8	NODE 8	(NODE 4, NODE 9, NODE 13)	3
9	NODE 9	(SINK)	1
10	NODE 10	(NODE 6, NODE 11)	2
11	NODE 11	(NODE 7, NODE 12)	2
12	NODE 12	(NODE 8, NODE 13)	2
13	NODE 13	(NODE 9, SINK)	2

Na etapie inicjalizacji sieci węzły typu NODE wysyłają wiadomości rozgłoszeniowe informujące o ich stanie do sąsiednich węzłów (tj. węzłów znajdujących się w ich zasięgu radiowym). Wiadomości zawierają informacje o stanie baterii, liczbie przeskoków do węzła SINK oraz poziomie mocy sygnału RSSI. Jednocześnie każdy węzeł otrzymuje informacje zwrotne o swoich sąsiadach i przesyła je do węzła SINK odpowiadającego za analizę informacji (o wszystkich węzłach sieci i ich sąsiadach) oraz przeprowadzenie obliczeń

(zgodnie z opracowanym algorytmem bazowym). W pierwszej fazie pozycja i prędkość są określane losowo w zakresie $(0,1>$. W zależności od nowej pozycji (obliczonej zgodnie z algorytmem trasowania) określany jest sąsiedni węzeł, do którego zostaną wysłane dane. Na rysunku 28 przedstawiono połączenia węzłów po wykonaniu pierwszej iteracji algorytmu.



Rys. 28. Widok struktury sieci po wykonaniu iteracji algorytmu

Wykonanie zaprogramowanych działań pozwala każdemu węzłowi wybrać najlepszego sąsiada, zgodnie z funkcją celu i wyznaczoną wartością położenia cząstek (Tabela 5).

Struktura węzłów badanej sieci sensorycznej po wykonaniu pierwszej iteracji algorytmu

Tabela 5.

Lp.	Węzły	Położenie i-tej cząstki w D wymiarowej przestrzeni $X_{i,D}$	Liczba możliwych do połączenia węzłów
1	NODE1	0,94	2
2	NODE 2	0,38	2
3	NODE 3	0,17	2
4	NODE 4	0,75	2
5	NODE 5	0,46	3
6	NODE 6	0,63	3
7	NODE 7	0,55	3
8	NODE 8	0,68	3

Lp.	Węzły	Położenie i-tej cząstki w D wymiarowej przestrzeni $X_{i,D}$	Liczba możliwych do połączenia węzłów
9	NODE 9	0,81	1
10	NODE 10	0,91	2
11	NODE 11	0,86	2
12	NODE 12	0,73	2
13	NODE 13	0,86	2

W kroku II.1.c węzeł SINK oblicza indeks węzła docelowego, uwzględniając liczbę jego sąsiadów oraz pozycję cząstki P_i , a następnie (na podstawie obliczonego indeksu) wybierany jest odpowiedni sąsiad.

W kolejnym kroku algorytmu informacje o wybranym sąsiedzie są przekazywane do węzłów typu NODE. Procedura ta gwarantuje, że dane o wybranym sąsiedzie docierają do konkretnych węzłów typu NODE.

Na obecnym etapie rozwoju algorytmu procedura wyznaczania ścieżki danych w sieci jest uruchamiana w ściśle definiowanych (konfigurowalnych przez użytkownika) odstępach czasu. Główne obliczenia algorytmiczne odbywają się w węźle SINK, który może być zasilany z przewodowej sieci energetycznej (co zapewnia wysoką moc obliczeniową).

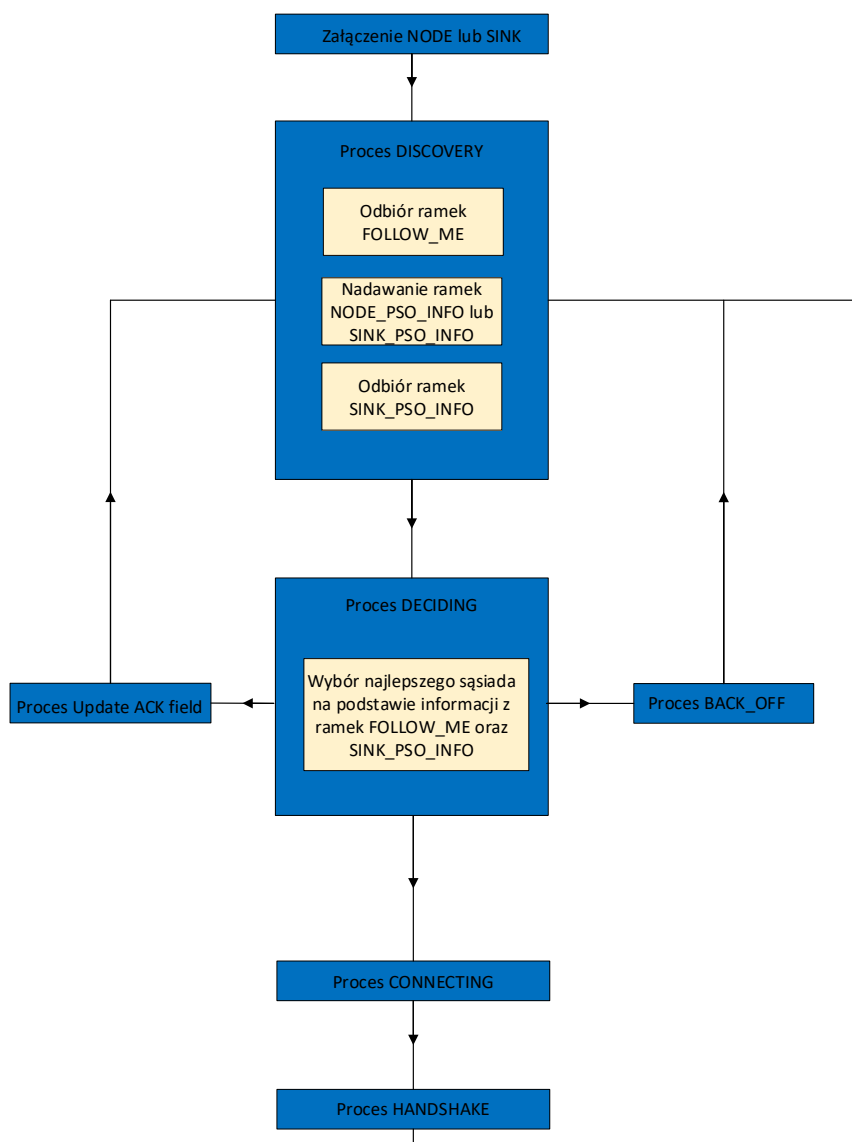
Aby zapobiec zapętleniom w sieci, po wyznaczeniu sąsiada, z którym realizowany będzie proces połączeniowy, weryfikowane są trasy danych wysyłanych pakietów przez każdy węzeł. Jeśli dana ścieżka nie prowadzi do węzła typu SINK wartość funkcji celu jest obniżana.

W przeciwnym razie, wartość funkcji celu jest zwiększana, co pozwala algorytmowi dążyć do wyznaczenia ścieżki prowadzącej do węzła typu SINK (w odniesieniu do każdego węzła). Po każdej iteracji algorytmu wyznaczane jest nowe położenie cząstek, które jest używane przy wyborze najlepszego sąsiada w przypadku każdego z węzłów typu NODE.

4.2.1 Implementacja

Opracowany algorytm bazuje na stosie programowym FruityMesh [92], w warstwie odpowiedzialnej za wybór sąsiada, z którym realizowane jest połączenie. Do zalet zastosowanego stosu można zaliczyć prostotę i łatwość

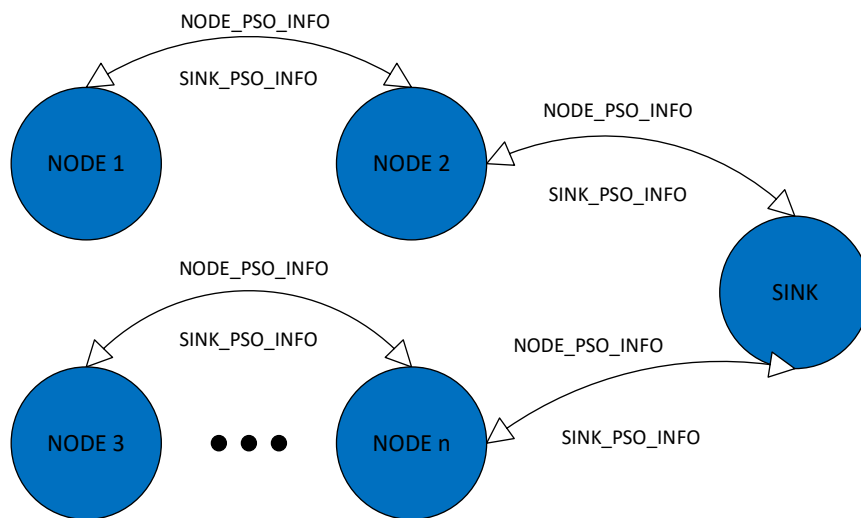
integracji, skalowalność, energooszczędność, odporność na awarie, centralne zarządzanie i monitorowanie, niską latencję oraz wsparcie wielu różnorodnych urządzeń. Schemat blokowy implementacji algorytmu trasowania w strukturze stosu FruityMesh przedstawiono na rysunku 29.



Rys. 29. Schemat blokowy implementacji algorytmu trasowania w strukturze stosu FruityMesh

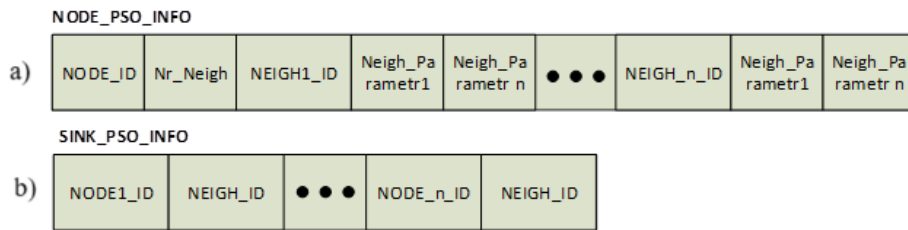
Wyniki obliczeń algorytmu odpowiadającego za wyznaczenie optymalnego rozwiązania globalnego umieszczone zostają w węźle typu SINK. Dane z każdego węzłów typu NODE przesyłane do węzła SINK, zawierające informację o parametrach każdego z jego sąsiadów (ramki o nazwie NODE_PSO_INFO), mogą zostać przesyłane w ramach danych (lub w ramach rozgłoszeniowych tzw. Adverstiment) po przeprowadzeniu procesu połączenia.

Węzeł typu SINK odbiera ramki NODE_PSO_INFO (rys. 30, rys. 31a). Na podstawie danych z każdego węzła, zgodnie z przedstawionymi wzorami 2, 3, 5, 6, 12, w węźle wyznaczane są optymalne rozwiązania lokalne (w przypadku poszczególnych węzłów) oraz globalne (obejmujące cały rój).



Rys. 30. Schemat obiegu ramek danych SINK_PSO_INFO oraz NODE_PSO_INFO

Informacje o wyborze sąsiada wysyłane są z węzła typu SINK (do poszczególnych węzłów typu NODE) poprzez ramki o nazwie SINK_PSO_INFO (rys. 30). Strukturę danych opisanych ramek komunikacyjnych przedstawiono na rysunku 31.



Rys. 31. Struktura danych ramek komunikacyjnych zastosowanych w algorytmie trasowania sieci sensorycznej węzłów typu: a) NODE_PSO_INFO, b) SINK_PSO_INFO)

Ramki NODE_PSO_INFO (rys. 31a) zawierają w swojej strukturze informacje na temat wszystkich sąsiadów węzła typu NODE, w tym:

- NODE_ID - numer ID danego węzła,
- Nr_Neigh - liczba sąsiadów danego węzła NODE,
- NEIGH_n_ID - numer ID każdego z sąsiadów węzła typu NODE,
- Neigh_Parametr_n - parametry charakteryzujące sąsiada węzła typu NODE.

Ramka SINK_PSO_INFO (rys. 31b) zawierają jedynie dwa podstawowe parametry informacyjne:

- NODE_n_ID - numer ID węzła typu NODE,
- ID (NEIGH_ID) – ID najlepszego sąsiada węzła NODE_n_ID wyznaczonego przez algorytm.

4.2.2 Metoda realizacji badań

Do celów badań oraz walidacji algorytmu w prototypie sieci konieczne było opracowanie środowiska sieci składającej się z co najmniej 30 węzłów. Wybór tej liczby węzłów wynikał z wymogów statystycznych, które nakładają konieczność odpowiednio dużej liczby próbek, aby uzyskać wiarygodne i reprezentatywne wyniki. Liczba 30 węzłów minimalizuje ryzyko losowych odchyleń, co pozwala na precyzyjną analizę danych. Symulacje pracy sieci sensorycznych wskazywały, że dopiero od liczby 10 węzłów zaczynały się pojawiać zauważalne zmiany w analizowanych parametrach, a liczba 30 węzłów była niezbędna, aby uzyskać stabilne i miarodajne wyniki.

Założono, że prototypowane środowisko musi zapewniać pomiar następujących wielkości: czas dotarcia pakietu do miejsca docelowego, współczynnik PDR, przepustowość sieci oraz zużycie energii przez poszczególne węzły. Należy również uzyskać funkcjonalność wysyłania pakietów danych (z każdego węzła) o określonej wielkości.

Podczas procesu przesyłania pakietów danych w sieci założono rejestrację wszystkich parametrów pomiarowych zdefiniowanych w ramach założeń. Przy czym procedura badań obejmuje cyklicznie zwiększanie liczby aktywnych węzłów sieci, z jednoczesnym wykonaniem pomiarów, aż do osiągnięcia założonej liczebności elementów składowych sieci.

Poszczególne pomiary były realizowane w sieci działającej bez oraz z zaimplementowanym algorytmem pracującym w oparciu o inteligencję roju. Wyniki pomiarów poddano analizie statystycznej rozpatrując dwie opisane przyjęte do badań konfiguracje algorytmu sieci sensorycznej.

5. Projekt i implementacja prototypowej sieci sensorycznej

Zaprojektowanie oraz implementacja algorytmu trasowania, opisanego w rozdziale 4, wymagały przygotowania kompletnego środowiska sprzętowo-programowego. W niniejszym rozdziale przedstawiono założenia funkcjonalne sieci, dobór modułów sprzętowych, przyjętą topologię, architekturę środowiska uruchomieniowego oraz sposób realizacji pomiarów parametrów charakteryzujących pracę sieci.

5.1 Założenia funkcjonalne sieci sensorycznej

Projektowana sieć sensoryczna została pomyślana jako element systemu monitorowania parametrów pracy sekcji obudowy zmechanizowanej, opisanego w rozdziale 2. Węzły mają docelowo rejestrować m.in.: wartości ciśnienia w siłownikach stojaków hydraulicznych, parametry geometrii sekcji (pochylenia stropnicy, spągnicy, odległość od czoła ściany), wybrane dane diagnostyczne modułów (np. poziom zasilania, obciążenie transmisyjne).

W kontekście tych zadań zdefiniowano kluczowe wymagania funkcjonalne. Sieć musi zapewniać możliwie wysoki współczynnik PDR oraz możliwość odtworzenia ścieżek przebiegu pakietów, a więc ciągłość i pewność transmisji danych, przy jednoczesnym zachowaniu kontrolowanego czasu reakcji systemu – opóźnienie end-to-end powinno pozwalać na bieżącą diagnostykę i analizę zdarzeń zachodzących w ścianie. Istotnym wymaganiem jest również energooszczędność węzłów: przyjęto, że zasilanie ma odbywać się z baterii lub źródeł typu *energy harvesting*, a czas pracy bez wymiany źródła zasilania powinien wynosić co najmniej 12 miesięcy. Dodatkowo węzły muszą być zgodne z wymaganiami środowiska pracy, tj. zdolne do bezpiecznego działania w rejonie zagrożenia wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego, co determinuje konieczność projektowania elektroniki zgodnie z wymaganiami dyrektywy ATEX. Na poziomie walidacji algorytmu przyjęto, że sieć będzie analizowana w dwóch skalach:

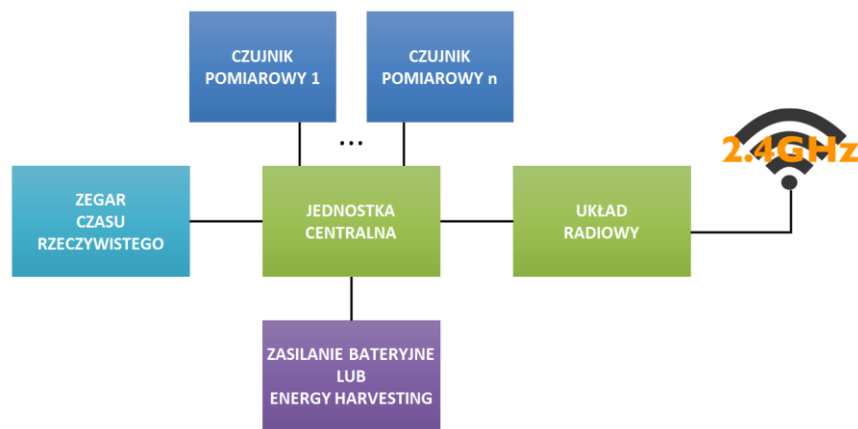
- środowisko minimalne – sieć złożona z 3 węzłów, umożliwiającą wstępne sprawdzenie poprawności implementacji algorytmu i mechanizmów transmisji,
- środowisko rozbudowane – sieć składająca się docelowo z 30 węzłów, odzwierciedlająca bardziej złożone warunki pracy, typowe dla sieci monitorującej fragment ściany wydobywczej.

W obu przypadkach przyjęto, że wszystkie węzły mogą pełnić funkcję routerów pośredniczących, a węzeł typu SINK stanowi bramę do systemu nadrzędnego.

5.2 Architektura sprzętowa pojedynczego węzła sieci

Aby możliwe było zaimplementowanie zaproponowanego algorytmu trasowania, konieczne było zdefiniowanie wymagań dotyczących konstrukcji pojedynczego węzła sieci sensorycznej. Założono, że każdy węzeł będzie miał strukturę modułową, obejmującą jednostkę centralną (mikrokontroler) o odpowiedniej mocy obliczeniowej oraz układ radiowy obsługujący komunikację w topologii kratowej (Mesh), a także interfejsy do czujników pomiarowych i interfejs komunikacyjny do systemu diagnostycznego (np. USB–UART). Uzupełnieniem tej struktury jest układ zasilania bateryjnego lub typu energy harvesting oraz zegar czasu rzeczywistego (RTC) bądź mechanizm umożliwiający synchronizację czasu po stronie systemu nadrzędnego.

Schemat blokowy funkcjonalnej struktury pojedynczego węzła przedstawiono na rysunku 32. Węzeł obejmuje jednostkę centralną, do której dołączono czujniki pomiarowe, moduł radiowy (w praktyce zintegrowany z mikrokontrolerem), pamięć nieulotną na potrzeby konfiguracji i buforowania danych, układ zasilania z możliwością pracy w trybie uśpienia oraz układy nadzorujące.



Rys. 32. Blokowy schemat funkcjonalny pojedynczego węzła sieci sensorycznej

W projektowaniu przyjęto następujące kluczowe założenia. Po pierwsze, wymagana jest niska energochłonność – mikrokontroler powinien umożliwiać wielokrotne przejścia w tryb uśpienia przy zachowaniu zdolności do okresowego wybudzania i realizacji pomiarów. Po drugie, układ radiowy musi wspierać protokoły oparte na technologii Bluetooth Low Energy (BLE) z funkcją pracy w sieci kratowej (Mesh). Kolejnym założeniem są kompaktowe wymiary węzła, wynikające z konieczności jego zabudowy w rejonie sekcji obudowy oraz ograniczonej przestrzeni montażowej. Wreszcie, węzeł powinien być przygotowany do implementacji rozbudowanego stosu protokołów, tak aby możliwa była obsługa pakietów SDK dedykowanych do BLE Mesh.

W tabeli 6 zestawiono analizowane moduły radiowe spełniające powyższe założenia, uwzględniając takie parametry, jak: cena, energochłonność, moc obliczeniową, obsługiwane protokoły i wymiary. Na tej podstawie dokonano następujących obserwacji:

- moduły **CC2x** firmy Texas Instruments są atrakcyjne cenowo, jednak integrują 8-bitowy mikrokontroler 8051, co ogranicza dostępne zasoby obliczeniowe,
- moduły **EFR32XG21** charakteryzują się niską energochłonnością i wysoką mocą obliczeniową oraz obsługą wielu protokołów,
- moduły **ESP32** oraz **nRF52** wyróżniają się korzystnym stosunkiem ceny do możliwości, oferując odpowiednią moc obliczeniową i wsparcie dla BLE.

Uwzględniając łącznie: koszt, energochłonność, moc obliczeniową, wymiary gabarytowe oraz wymagania aplikacji, za najbardziej perspektywiczne uznano moduły nRF52 firmy Nordic Semiconductor oraz EFR32XG21 firmy Silicon Labs. Do budowy prototypu sieci sensorycznej wybrano ostatecznie moduły nRF52, uzupełnione wstępnymi testami modułów EFR32XG21.

W ramach bilansu energetycznego przyjęto, że pojedynczy węzeł będzie zasilany z ogniwa o pojemności 1000–1500 mAh. Oszacowano, że przy pojemności 1000 mAh średnia moc pobierana w czasie pracy powinna mieścić się w przedziale 5–40 mW, natomiast w trybie uśpienia wartość ta powinna wynosić 5–50 μ W. Aby osiągnąć takie parametry, zaproponowano m.in. wyłączanie zasilania elementów peryferyjnych za pomocą kluczy tranzystorowych MOSFET oraz zastosowanie superkondensatorów i przetwornic DC/DC w przypadku zasilania typu energy harvesting.

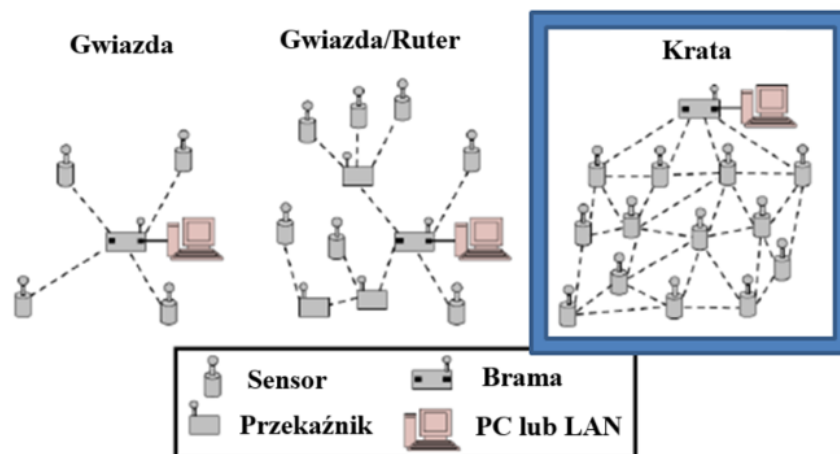
Zestawienie parametrów porównywanych modułów radiowych

Tabela 6

Lp.	Moduł radiowy	Producent	Obsługiwane protokoły	Pobór mocy	Częstotliwość pracy	Interfejsy	Procesor
1.	nRF52	Nordic Semiconductor	Multi-protocol support	7.5mA TX/ 5.4mA RX przy 3.3V	2.4 GHz	SPI, 2-wire, FS, UART, PDM, QDEC	ARM Cortex-M4
2.	EFR32XG21	Silicon Labs	ZigBee, Thread, BLE, Multi-protocol support	10mA RX/TX at 3.3V	2.4 GHz	UART, SPI, SmartCard (ISO 7816), I2C, I2S, I ² C	ARM Cortex-M4
3.	CC25x	Texas Instruments	ZigBee, RF4CE, IEEE 802.15.4, SimpliciTI, Multi-protocol support	29mA TX/ 24mA RX at 3.3V	2.4 GHz, Sub 1GHz	UART	8051
4.	ESP32	Espressif Systems	Bluetooth, WiFi	100mA at 3.3V	2.4GHz	SPI, UART, I2S, I ² C, CAN, ETH	Tensilica Xtensa 32-bit LX6

5.3 Topologia sieci i rozmieszczenie węzłów

Strukturę połączeń projektowanej sieci sensorycznej zdefiniowano w postaci topologii kratowej (Mesh). Schematyczne porównanie dostępnych topologii sieci sensorycznych oraz wybór konfiguracji przedstawiono na rysunku 33.



Rys. 33. Wybór topologii sieci czujników - schematyczne ujęcie dostępnych odmian topologii sieci sensorycznych [22]

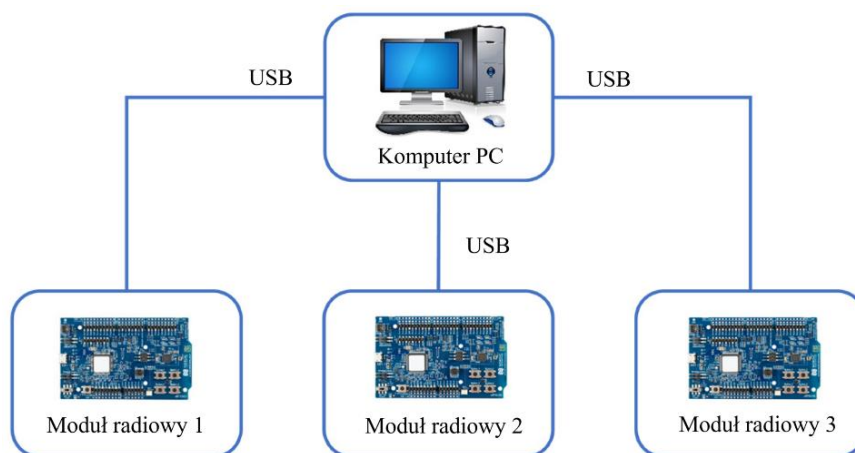
Wybór topologii kratowej został podyktowany kilkoma kluczowymi względami. Po pierwsze, zapewnia ona wysoką odporność na awarie – uszkodzenie pojedynczego węzła nie powoduje przerwania struktury sieci, a ruch może zostać przekierowany alternatywnymi ścieżkami. Po drugie, eliminuje występowanie pojedynczych wąskich gardeł, ponieważ każdy węzeł posiada dedykowane łącza punkt–punkt do sąsiadów, co ogranicza lokalne przeciążenia. Istotna jest także możliwość inicjowania wielu ścieżek transmisji danych między węzłami typu NODE a węzłem typu SINK, co sprzyja implementacji algorytmów zoptymalizowanych pod względem współczynnika PDR, opóźnień oraz energochłonności. Dodatkową zaletą jest prostota diagnostyki – uszkodzenia poszczególnych segmentów sieci można lokalizować na podstawie analizy ścieżek i przerw w transmisji. W docelowym zastosowaniu w kompleksie ścianowym przyjęta topologia odpowiada sytuacji, w której węzły rozmieszczone są wzdłuż ściany, w rejonie sekcji obudowy, oraz – w razie potrzeby – w wyrobiskach przyścianowych, natomiast węzeł typu SINK pełni funkcję

nadrzędnego punktu zbierającego dane oraz bramy do systemu wizualizacji i archiwizacji.

5.4 Środowisko uruchomieniowe i komunikacja zewnętrzna

5.4.1 Stanowisko do walidacji sieci 3-węzłowej

W pierwszym etapie badań opracowano środowisko walidacyjne sieci składającej się z trzech węzłów. Struktura tego stanowiska została przedstawiona na rysunku 34.

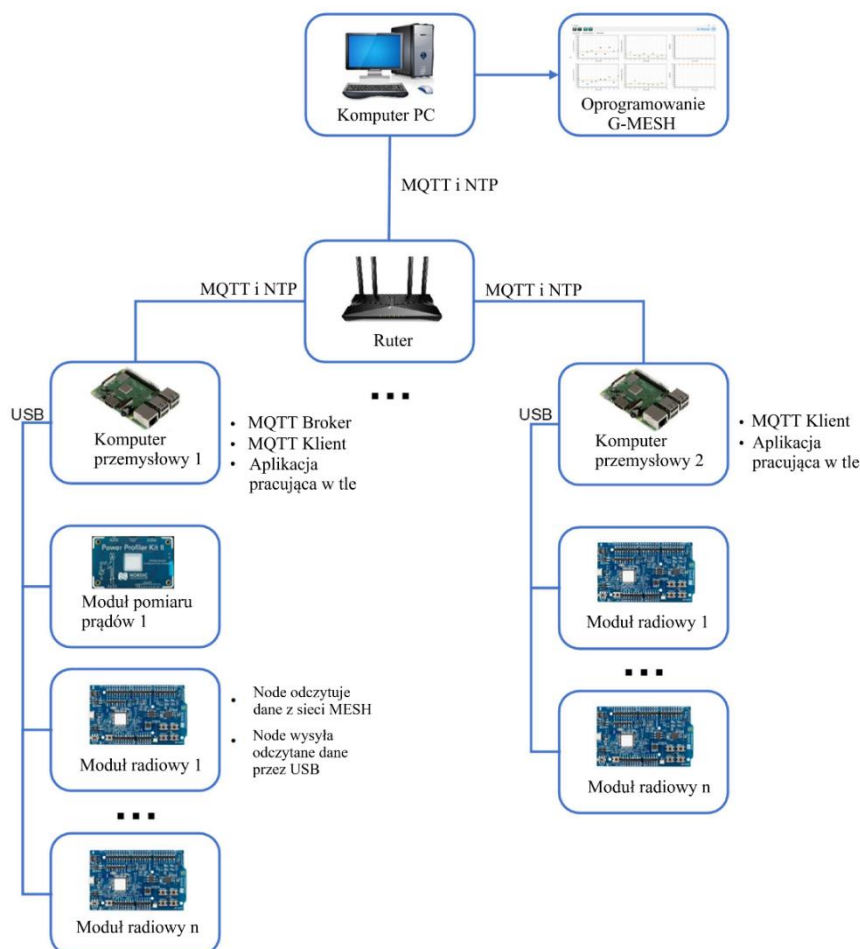


Rys. 34. Schemat blokowy stanowiska badawczego do procesu walidacji - badanie 3 węzłów sieci

Moduły radiowe nRF52 podłączono bezpośrednio do komputera klasy PC za pomocą interfejsu USB, co umożliwiło dwukierunkową transmisję danych pomiarowych, konfigurację węzłów oraz wstępną wizualizację przesyłanych ramek. Na tej podstawie opracowano pierwszą wersję oprogramowania, realizującą zarówno przesyłanie danych w sieci za pośrednictwem modułów radiowych, jak i odczyt, wizualizację oraz archiwizację danych pomiarowych na komputerze PC.

5.4.2 Stanowisko do walidacji sieci 30-węzłowej

W celu walidacji pracy sieci o większej liczbie węzłów (do 30) środowisko zostało rozbudowane o mikrokomputery Raspberry Pi, co pokazano na rysunku 35.



Rys. 35. Schemat stanowiska badawczego do procesu walidacji - badanie 30 węzłów sieci

Mikrokomputery Raspberry Pi pełniły funkcję lokalnych koncentratorów danych – odbierały informacje z modułów radiowych nRF52 przez USB (emulowany port szeregowy), dodawały znaczniki czasowe synchronizowane za pomocą protokołu NTP, a następnie przesyłały dane dalej za pośrednictwem

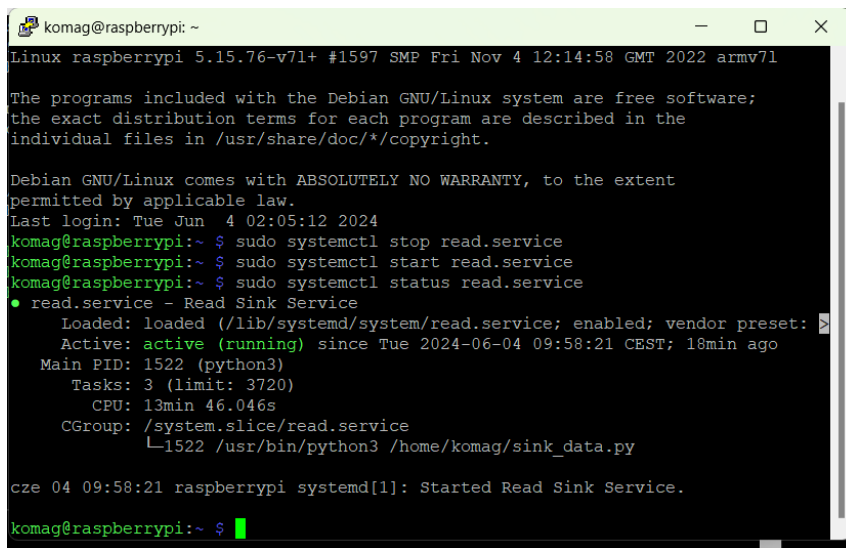
protokołu MQTT do aplikacji G-MESH zainstalowanej na komputerze PC. Konfigurację sieci lokalnej realizowano z wykorzystaniem routera Wi-Fi, który przydzielał adresy IP komputerom Raspberry Pi poprzez serwer DHCP, umożliwiając zdalne łączenie się z każdym urządzeniem przy użyciu protokołu SSH (np. za pomocą aplikacji Putty) oraz zapewniał współdzielenie dostępu do brokera MQTT i synchronizację czasu.

Na rysunku 36 przedstawiono widok panelu administracyjnego routera, w którym widoczna jest lista komputerów Raspberry Pi z przydzielonymi adresami IP. Ułatwia to identyfikację urządzeń oraz zarządzanie rozproszonym stanowiskiem badawczym.

- Alexa & IFTTT - IPv6 - VPN - Firewall - Administracja - Logi systemowe - Narzędzia sieciowe	Ręczny Przydział			
	Odblokuj ręczny przydział ☒ Tak ☐ Nie			
	Ręcznie przydzielone adresy IP poza DHCP (Maks. ilość : 64)			
	Nazwa klienta (Adres MAC)	Adres IP	Adres IP serwera DNS (Optional)	Dodaj / Usuń
	ex: 3C:7C:3F:67:20:10			+
	raspberrypi E4:5F:01:D6:14:7A	192.168.0.147	wartość domyślna	-
	E4:5F:01:D6:14:99 E4:5F:01:D6:14:99	192.168.0.98	wartość domyślna	-
	E4:5F:01:D5:FF:35 E4:5F:01:D5:FF:35	192.168.0.96	wartość domyślna	-
	raspberrypi E4:5F:01:D6:14:05	192.168.0.99	wartość domyślna	-
	E4:5F:01:D6:14:81 E4:5F:01:D6:14:81	192.168.0.100	wartość domyślna	-
	raspberrypi E4:5F:01:C3:CA:4F	192.168.0.101	wartość domyślna	-

Rys. 36. Widok pulpitu zarządzania routera z widocznymi urządzeniami Raspberry Pi

Rysunek 37 ilustruje przykładową sesję zdalnego połączenia z jednym z mikrokomputerów Raspberry Pi z wykorzystaniem protokołu SSH. Rozwiązanie to umożliwia zdalną konfigurację oprogramowania oraz diagnostykę działania systemu bez konieczności fizycznego dostępu do urządzenia.



```
komag@raspberrypi: ~
Linux raspberrypi 5.15.76-v7l+ #1597 SMP Fri Nov 4 12:14:58 GMT 2022 armv7l

The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

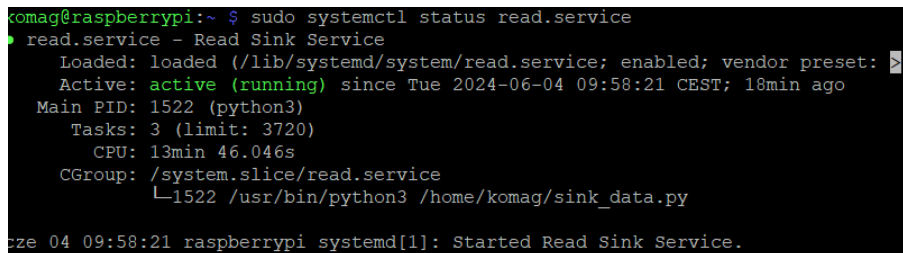
Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Tue Jun  4 02:05:12 2024
komag@raspberrypi:~ $ sudo systemctl stop read.service
komag@raspberrypi:~ $ sudo systemctl start read.service
komag@raspberrypi:~ $ sudo systemctl status read.service
● read.service - Read Sink Service
   Loaded: loaded (/lib/systemd/system/read.service; enabled; vendor preset:
   Active: active (running) since Tue 2024-06-04 09:58:21 CEST; 18min ago
   Main PID: 1522 (python3)
     Tasks: 3 (limit: 3720)
        CPU: 13min 46.046s
   CGroup: /system.slice/read.service
           └─1522 /usr/bin/python3 /home/komag/sink_data.py

cze 04 09:58:21 raspberrypi systemd[1]: Started Read Sink Service.

komag@raspberrypi:~ $
```

Rys. 37. Widok przykładowego okna komunikacji z komputerem Raspberry Pi poprzez protokół SSH

Na rysunku 38 przedstawiono przykładowy podgląd pracy urządzenia w trakcie sesji SSH, obejmujący m.in. uruchomione procesy oraz logi aplikacji. Ułatwia to nadzór nad poprawnością akwizycji danych oraz działaniem usług systemowych.



```
komag@raspberrypi:~ $ sudo systemctl status read.service
● read.service - Read Sink Service
   Loaded: loaded (/lib/systemd/system/read.service; enabled; vendor preset:
   Active: active (running) since Tue 2024-06-04 09:58:21 CEST; 18min ago
   Main PID: 1522 (python3)
     Tasks: 3 (limit: 3720)
        CPU: 13min 46.046s
   CGroup: /system.slice/read.service
           └─1522 /usr/bin/python3 /home/komag/sink_data.py

cze 04 09:58:21 raspberrypi systemd[1]: Started Read Sink Service.
```

Rys. 38. Serwis obsługujący oprogramowanie komputera Raspberry Pi do którego podłączony był węzeł typu SINK

5.4.3 Oprogramowanie na Raspberry Pi

Na mikrokomputerach Raspberry Pi z systemem operacyjnym Raspbian uruchomiono aplikacje napisane w języku Python: `nodes_control_data.py`, odpowiadającą za odbiór danych diagnostycznych z węzłów typu NODE poprzez interfejs `ttyACM` oraz publikowanie ich w odpowiednich tematach protokołu MQTT (rys. 39),

```
GNU nano 5.4 nodes_control_data.py
import glob
import pyudev
import serial
import threading
import time
import paho.mqtt.client as mqtt

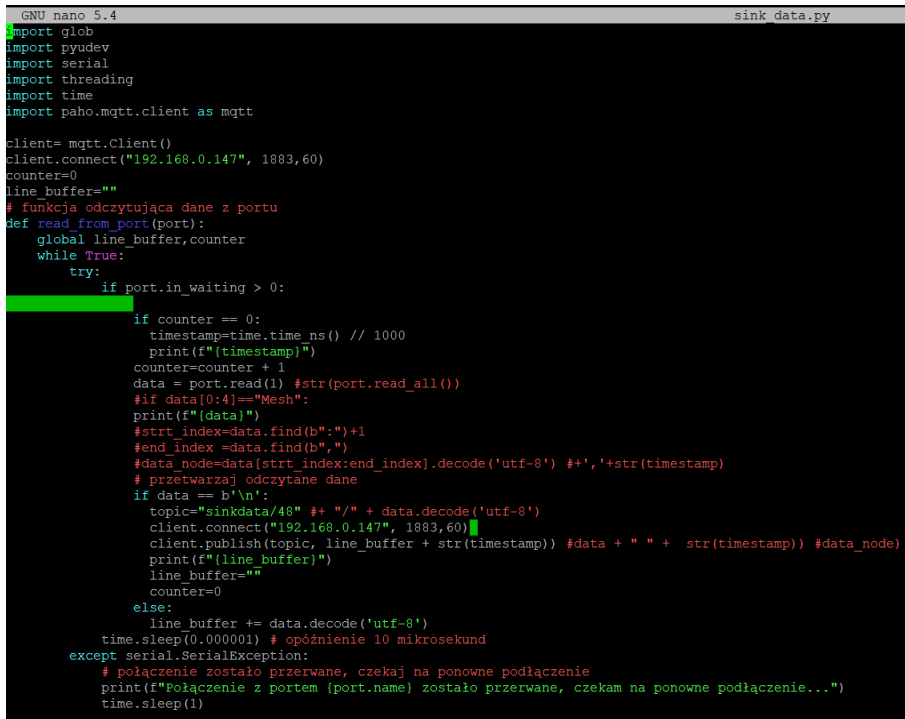
client= mqtt.Client()
client.connect("192.168.0.147", 1883,60)

# funkcja odczytująca dane z portu
def read_from_port(port):
    while True:
        try:
            if port.in_waiting > 0:
                timestamp=time.time ns() // 1000
                data = port.read_all()
                #str_index=data.rindex(b":") #data.find(b":")+1
                #str_index+=2
                #end_index =data.find(b",")
                #data_node=data[str_index:len(data)].decode('utf-8') #'+','+str(timestamp)
                # przetwarzaj odczytane dane
                topic="nodedata" + "/" + data.decode('utf-8')
                client.connect("192.168.0.147",1883,60)
                client.publish(topic, timestamp) #data_node
                print(f"{data}")
                #print(f"{str_index}")
                #print(f"{data_node}")
                time.sleep(0.000001) # opóźnienie 10 mikrosekund
            except serial.SerialException:
                # połączenie zostało przerwane, czekaj na ponowne podłączenie
                print(f"Połączenie z portem {port.name} zostało przerwane, czekam na ponowne podłączenie...")
                time.sleep(1)

# wyszukaj aktywne porty
active_ports = []
for port_name in glob.glob('/dev/ttyACM*'):
    try:
        port = serial.Serial(port_name, baudrate=1000000, timeout=0)
        active_ports.append(port)
        print(f"Znaleziono port {port.name}")
    except serial.SerialException:
        pass
```

Rys. 39. Kod aplikacji nodes_control_data.py zainstalowanej na komputerze Raspberry Pi obsługującego węzły typu NODE

Kolejnym programem jest plik sink_data.py, obsługującą dane napływające z węzła typu SINK, w tym większy strumień informacji związany z agregacją danych z całej sieci (rys. 40).



```

GNU nano 5.4                                     sink_data.py
import glob
import pyudev
import serial
import threading
import time
import paho.mqtt.client as mqtt

client = mqtt.Client()
client.connect("192.168.0.147", 1883, 60)
counter = 0
line_buffer = ""
# funkcja odczytująca dane z portu
def read_from_port(port):
    global line_buffer, counter
    while True:
        try:
            if port.in_waiting > 0:
                if counter == 0:
                    timestamp = time.time_ns() // 1000
                    print(f"{timestamp}")
                    counter = counter + 1
                    data = port.read(1) #str(port.read_all())
                    #if data[0:4] == "Mesh":
                    print(f"{data}")
                    #str_index = data.find(b":")+1
                    #end_index = data.find(b",")
                    #data_node = data[str_index:end_index].decode('utf-8') #'+','+str(timestamp)
                    # przetwarzaj odczytane dane
                    if data == b'\n':
                        topic = "sinkdata/48" #+ "/" + data.decode('utf-8')
                        client.connect("192.168.0.147", 1883, 60)
                        client.publish(topic, line_buffer + str(timestamp)) #data + " " + str(timestamp)) #data_node
                        print(f"{line_buffer}")
                        line_buffer = ""
                        counter = 0
                    else:
                        line_buffer += data.decode('utf-8')
                    time.sleep(0.000001) # opóźnienie 10 mikrosekund
        except serial.SerialException:
            # połączenie zostało przerwane, czekaj na ponowne podłączenie
            print(f"Połączenie z portem {port.name} zostało przerwane, czekam na ponowne podłączenie...")
            time.sleep(1)

```

Rys. 40. Kod aplikacji sink_data.py zainstalowanej na komputerze Raspberry Pi obsługującego węzeł typu SINK

Aplikacje te uruchamiano jako procesy działające w tle, zarządzane przez SystemD, co uprościło obsługę dużej liczby mikrokomputerów, umożliwiło automatyczne wznawianie działania po restarcie systemu oraz zapewniło stabilną akwizycję danych na potrzeby długotrwałych testów.

5.5 Oprogramowanie węzłów i system G-MESH

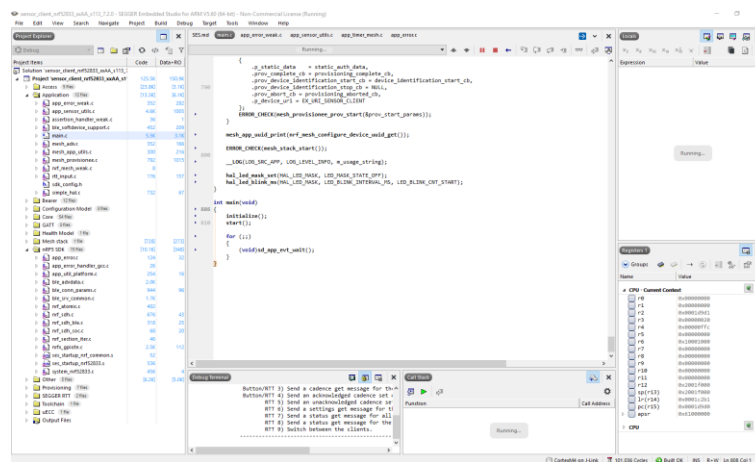
5.5.1 Wybór platformy radiowej i środowisk IDE

Na potrzeby implementacji stosu komunikacyjnego rozważano dwa główne rozwiązania sprzętowo-programowe: moduły nRF52 firmy Nordic Semiconductor, konfigurowane w środowisku Segger Embedded Studio z użyciem pakietu nRF5 SDK for Mesh v5.0.0 oraz moduły EFR32XG21 firmy Silicon Labs, uruchamiane w środowisku Simplicity Studio i testowane przy użyciu pakietu Bluetooth Mesh SDK.

W przypadku modułów nRF52 zainstalowano pakiet nRF5 SDK for Mesh, wgrano oprogramowanie do modułów za pomocą środowiska Segger Embedded

Studio, a następnie zweryfikowano obecność modułów w sieci Mesh przy użyciu aplikacji nRF Mesh na system Android.

Na rysunku 41 przedstawiono przykładowy ekran środowiska Segger Embedded Studio, ilustrujący proces przygotowania projektu oraz uruchomienia modułu nRF52. Widoczne są podstawowe elementy konfiguracji projektu, niezbędne do kompilacji stosu nRF5 SDK for Mesh i jego wgrania do modułu.



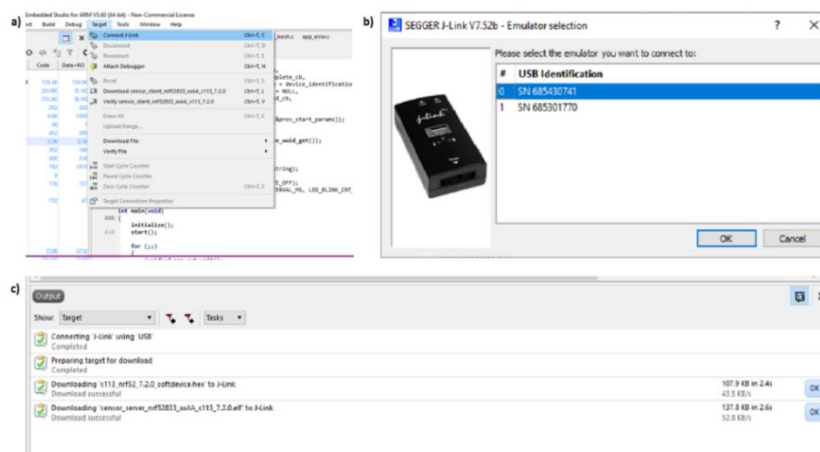
Rys. 41. Widok okna oprogramowania IDE Segger Studio - proces uruchomienia modułu radiowego nRF52

Rysunek 42 prezentuje fizyczne podłączenie dwóch modułów nRF52 do komputera za pomocą interfejsu USB oraz powiększony widok pojedynczego modułu. Umożliwia to ocenę sposobu zasilania, wyprowadzeń oraz złączy wykorzystywanych w stanowisku uruchomieniowym.



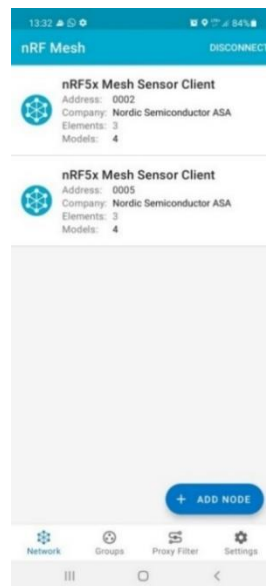
Rys. 42. Widok modułów radiowych nRF52: a) podłączenie dwóch modułów, b) powiększony widok pojedynczego modułu

Na rysunku 43 pokazano kolejne etapy współpracy środowiska Segger Embedded Studio z wbudowanym programatorem–debuggerem J-Link. Ilustruje on najpierw ustanowienie połączenia z programatorem, następnie wykrycie podłączonych układów radiowych, a na końcu procedurę wgrywania oprogramowania wewnętrznego do wybranego modułu nRF52.



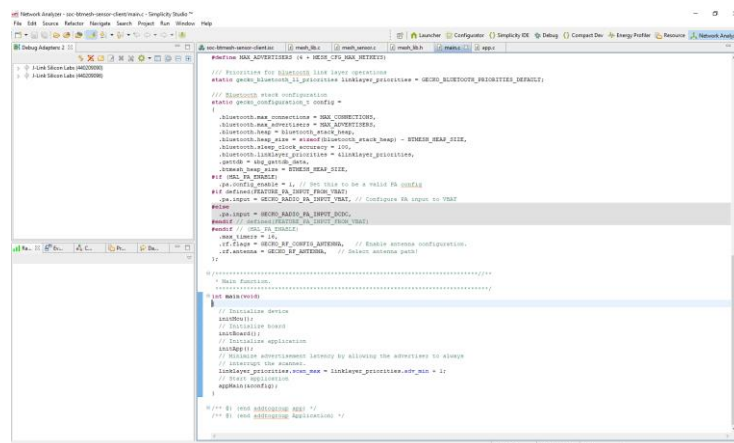
Rys. 43. Widok interfejsu oprogramowania IDE Segger Studio - proces uruchomienia modułu radiowego nRF52: a) połączenie z wewnętrznym debbugerem j-link, b) wykrycie podłączonych układów radiowych, c) realizacja procedury wgrywania oprogramowania wewnętrznego do wybranego układu radiowego

Rysunek 44 przedstawia widok aplikacji nRF Mesh działającej na systemie Android, prezentującej wykryte węzły sieci Bluetooth Mesh opartej na modułach nRF52. Widoczność węzłów w aplikacji potwierdza poprawność przeprowadzonej konfiguracji oraz uruchomienia stosu sieciowego.



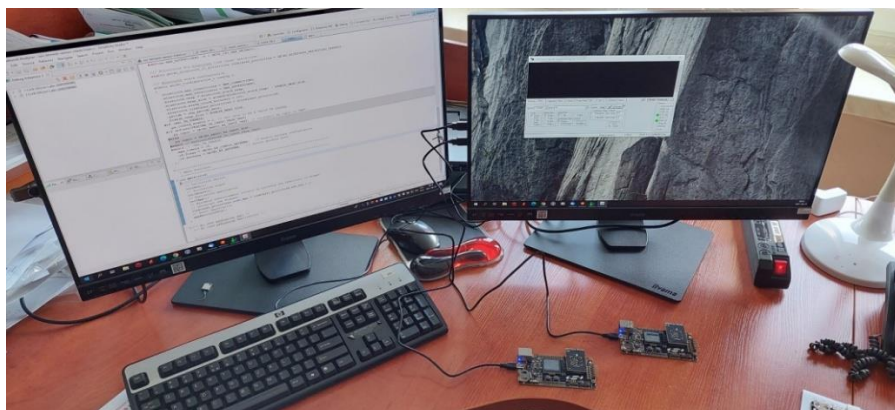
Rys. 44. Widoczność radiowa układów w sieci Mesh - aplikacja nRF5 Mesh na system Android

W odniesieniu do modułów EFR32XG21 wykorzystano środowisko Simplicity Studio IDE. Na rysunku 45 zaprezentowano główne okno środowiska Simplicity Studio IDE z załadowanym projektem dla modułu EFR32XG21. Widoczne są podstawowe komponenty projektu, konfiguracja biblioteki Bluetooth Mesh oraz ustawienia kompilacji.



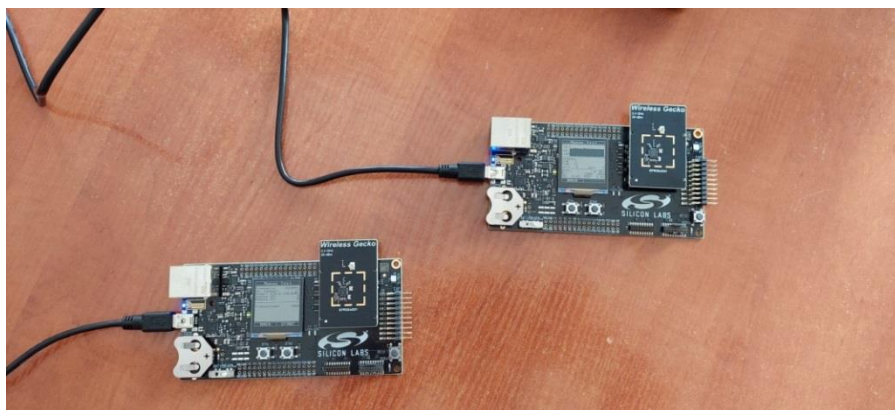
Rys. 45. Widok ekranu głównego okna środowiska Simplicity Studio IDE modułu EFR32XG21

Moduły EFR32XG21 skonfigurowano następnie w konfiguracji stanowiska uruchomieniowego jako nadajnik i odbiornik, co umożliwiło wstępne testy ich przydatności do implementacji autorskiego algorytmu trasowania. Rysunek 46 przedstawia schemat oraz widok praktycznego stanowiska uruchomieniowego z dwoma modułami EFR32XG21. Pokazano sposób ich zasilania, połączenia z komputerem oraz rozmieszczenie na płytkach testowych.



Rys. 46. Stanowisko uruchomieniowe modułów radiowych EFR32XG21

Na rysunku 47 zaprezentowano zbliżenie modułów EFR32XG21 umieszczonych na płytkach rozwojowych. Umożliwia to ocenę rozmieszczenia złączy, anteny oraz innych istotnych elementów układu z punktu widzenia integracji w przyszłym węźle sieci sensorycznej.



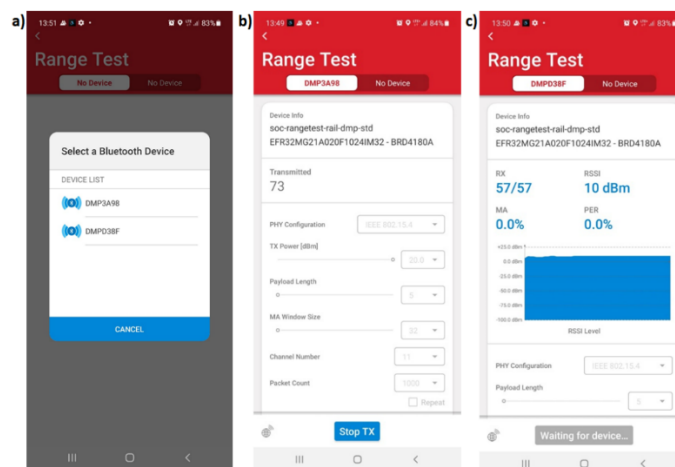
Rys. 47. Widok modułów radiowych EFR32XG21

Rysunek 48 pokazuje moduł EFR32XG21 skonfigurowany w roli nadajnika, z widocznymi elementami konfiguracji sprzętowej i sposobem podłączenia do pozostałej części stanowiska. Konfiguracja ta została wykorzystana w testach łączności z modulem pracującym jako odbiornik.



Rys. 48. Widok modułu radiowego EFR32XG21 (skonfigurowany jako nadajnik)

Na rysunku 49 przedstawiono przykładowe ekrany aplikacji EFR Connect. Część a) pokazuje wykrycie obecności modułów w sieci, natomiast części b) i c) prezentują szczegółowe informacje diagnostyczne dotyczące odpowiednio modułu nadawczego i odbiorczego. Pozwala to zweryfikować poprawność konfiguracji oraz obserwować parametry transmisji.

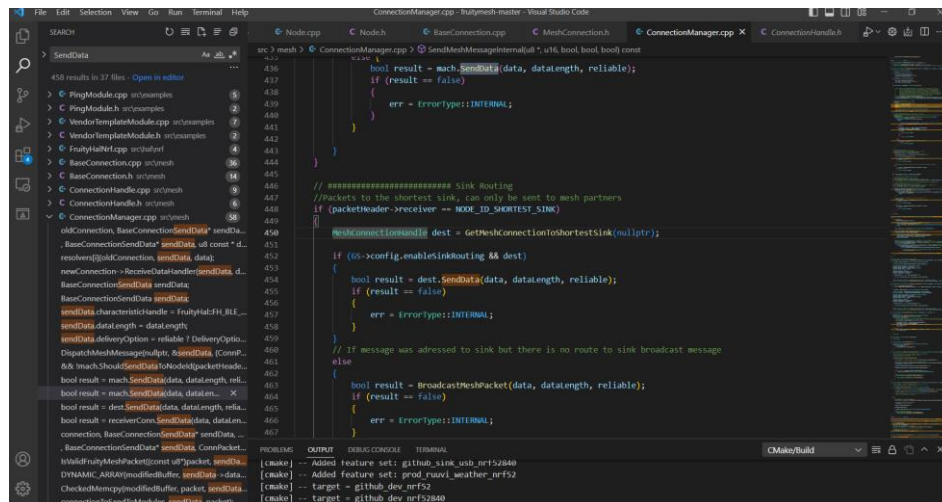


Rys. 49. Widok okien aplikacji EFR Connect firmy Silicon Labs dedykowanej na system Android: a) wykrycie obecności modułów w sieci, b) podgląd danych modułu nadawczego, c) podgląd danych modułu odbiorczego

Podczas prac z modułami EFR32XG21 zidentyfikowano jednak istotne ograniczenie – brak możliwości swobodnej modyfikacji oprogramowania modułów radiowych w stopniu niezbędnym do implementacji autorskiego algorytmu trasowania. Z tego względu zrezygnowano z dalszego stosowania modułów EFR32XG21, koncentrując się na platformie nRF52.

5.5.2 Prototypowanie oprogramowania modułów nRF52

Do implementacji algorytmu trasowania na modułach nRF52 wykorzystano stos programowy FruityMesh [87], zintegrowany z warstwą połączeniową Bluetooth 4.0 i kompilowany w środowisku Visual Studio Code (rys. 50).

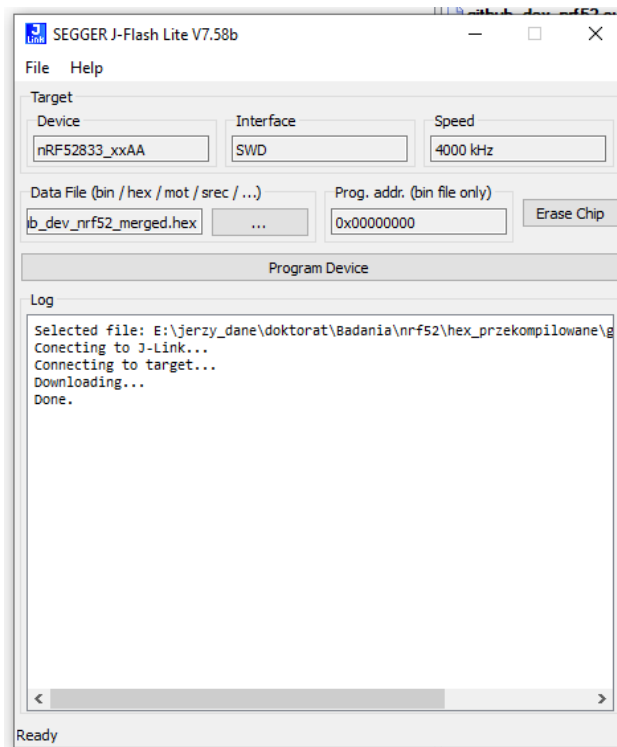


Rys. 50. Widok środowiska programistycznego modułu radiowego nRF52

Główne modyfikacje dotyczyły pliku odpowiedzialnego za obsługę węzła (Node.c), procedur obsługi przerwań przycisków, implementujących wysyłanie pakietów danych w sieci, oraz procedur obsługi przerwań odpowiedzialnych za odbiór danych, obejmujących interpretację zawartości pakietów i generowanie ramek diagnostycznych kierowanych do komputerów Raspberry Pi przez interfejs USB.

W przypadku węzła typu SINK dodatkowo zaimplementowano funkcje realizujące obliczenia związane z algorytmem trasowania oraz obsługę agregacji danych i przekazywania informacji o podjętych decyzjach routing. Oprogramowanie skonfigurowano w taki sposób, aby możliwa była oddzielna kompilacja kodu dla węzłów typu NODE oraz dla węzła typu SINK. W obu przypadkach generowano pliki binarne, które następnie wgrywano do

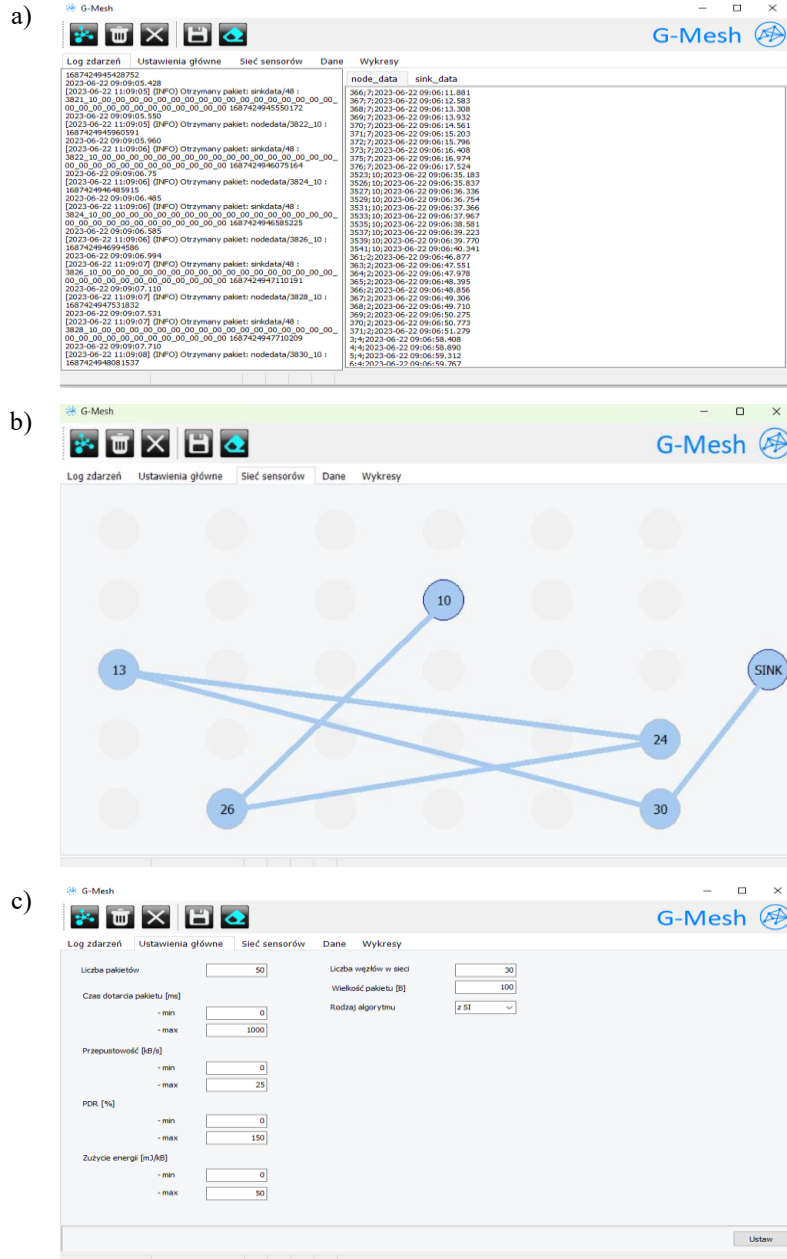
mikrokontrolerów za pośrednictwem oprogramowania Segger J-Flash oraz nRF Connect (rys. 51).

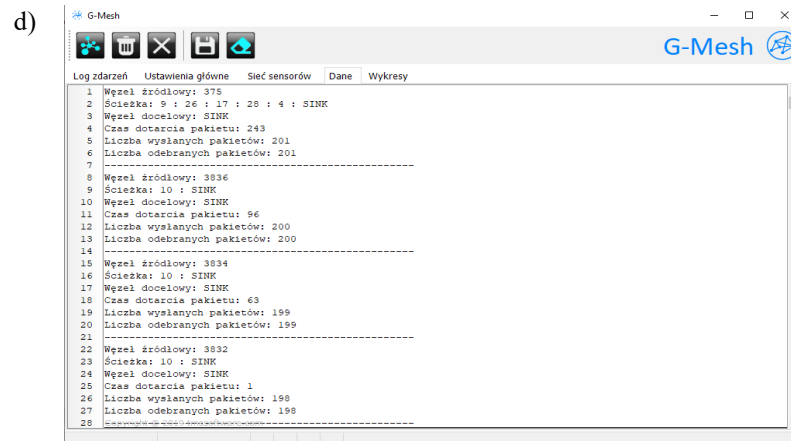


Rys. 51. Widok okna oprogramowania J-Flash firmy Segger

5.5.3 Oprogramowanie G-MESH na komputerze klasy PC

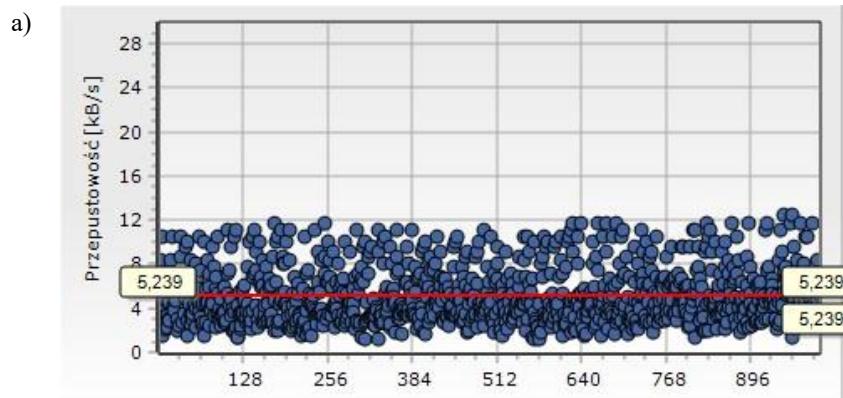
Do wizualizacji i analizy danych pomiarowych opracowano dedykowane oprogramowanie G-MESH. Pierwsza wersja aplikacji obsługiwała jedynie sieć 3-węzłową, odczytując dane poprzez symulowane porty szeregowo UART, natomiast wraz z rozbudową sieci funkcjonalność programu rozszerzono o obsługę protokołu MQTT (rys. 52). Aplikacja G-MESH umożliwia m.in. odbiór ramek danych z brokera MQTT i ich prezentację w oknie głównym (rys. 52a), wizualizację ścieżki transmisji pakietu danych od węzła typu NODE do węzła typu SINK (rys. 52b), konfigurację parametrów wyświetlania oraz zakresów osi wykresów (rys. 52c), a także podział danych na strumienie pochodzące z węzłów NODE i SINK (rys. 52d).

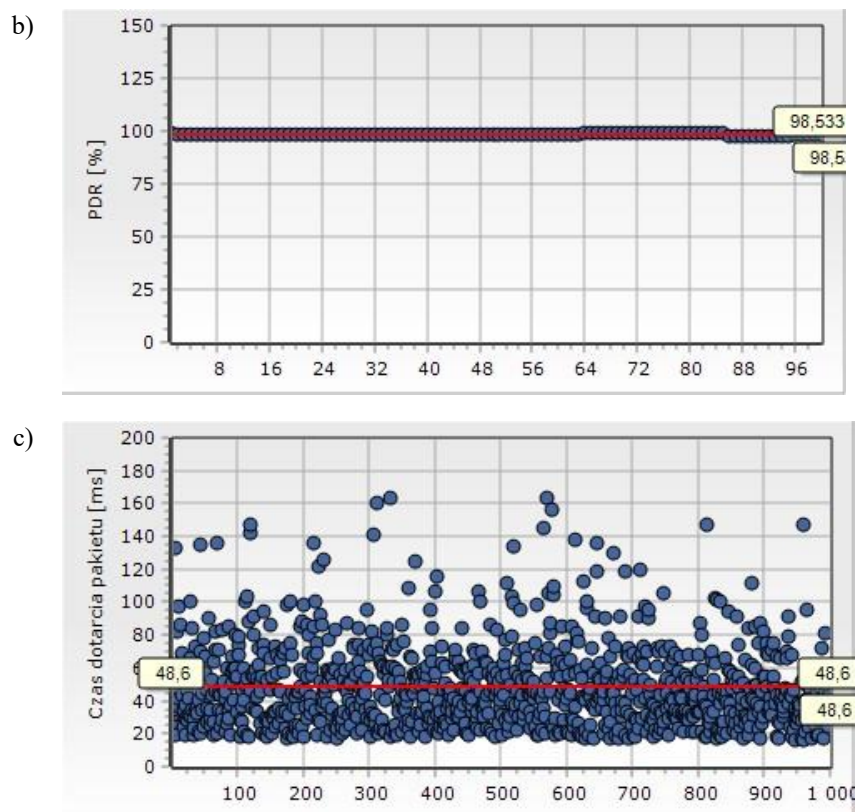




Rys. 52. Widok aplikacji G-MESH. gdzie: a) wyświetlanie treści komunikatów protokołu MQTT, b) wizualizacja ścieżki pakietu danych od źródła do celu, c) okno programu odpowiedzialne za konfigurację d) wyświetlanie informacji pobranych z ramek protokołu MQTT

Na rysunku 53 przedstawiono przykładowe wykresy generowane przez aplikację G-MESH, obejmujące przebieg przepustowości w czasie (rys. 53a), współczynnik pewności dostarczenia danych do miejsca docelowego PDR (rys. 53b) oraz czas dotarcia danych do miejsca docelowego (rys. 53c). Program umożliwia ponadto konfigurację liczby pakietów branych pod uwagę przy wyznaczaniu wartości średnich, zapis wygenerowanych wykresów w postaci plików graficznych oraz eksport zebranych danych pomiarowych do bazy danych i do plików zgodnych z formatem programu Excel, co ułatwia prowadzenie dalszych analiz statystycznych.





Rys. 53. Widok okien aplikacji G-MESH odpowiedzialnych za wyświetlenie zależności czasowych poszczególnych kryteriów pracy sieci sensorycznej, gdzie:
a) przepustowość, b) współczynnik pewności dostarczenia danych do miejsca docelowego, c) czas dotarcia danych do miejsca docelowego

5.6 Metodyka pomiarów parametrów sieci

W celu ilościowej oceny pracy sieci sensorycznej i walidacji algorytmu trasowania konieczne było zdefiniowanie oraz wdrożenie metodyki pomiarowej obejmującej wszystkie kryteria przedstawione w rozdziale 3 (tabela 3): przepustowość, czas dotarcia pakietu, PDR oraz zużycie energii.

5.6.1 Czas dotarcia pakietu do miejsca docelowego

W pomiarze czasu dotarcia pakietu przyjęto następującą procedurę: w momencie wysłania pakietu z węzła typu NODE do węzła typu SINK

generowana była ramka informująca o inicjacji transmisji, natomiast po odebraniu pakietu przez węzeł typu SINK wysyłano do komputera PC informację o jego odbiorze. Obie ramki opatrywano znacznikami czasowymi, a różnica pomiędzy czasem odebrania a czasem wysłania definiowała opóźnienie end-to-end. W pierwszych próbach wykorzystywano oprogramowanie RealTerm do monitorowania transmisji szeregowej, jednak brak obsługi znaczników czasowych skłonił do zastosowania programu CoolTerm, który taką funkcjonalność udostępnia. W środowisku rozbudowanej sieci synchronizacja czasu odbywała się z użyciem protokołu NTP na komputerach Raspberry Pi.

5.6.2 Przepustowość sieci

Przepustowość wyznaczano na podstawie czasu, w którym przesyłana była określona liczba danych z węzła źródłowego do węzła docelowego, oraz zarejestrowanej liczby bajtów transmitowanych w danym przedziale czasowym. Na tej podstawie obliczano przepustowość w jednostkach [kB/s], a wyniki prezentowano w aplikacji G-MESH w postaci przebiegów czasowych.

5.6.3 Pewność dostarczenia danych do miejsca docelowego

Współczynnik PDR (Packet Delivery Ratio) definiowano jako stosunek liczby pakietów odebranych do liczby pakietów wysłanych:

$$PDR = \frac{P_{receive}}{P_{send}} * 100\% \quad (13)$$

gdzie:

$P_{receive}$ - liczba pakietów odebranych,

P_{send} - liczba pakietów wysłanych.

Aby możliwe było obliczenie PDR, do danych diagnostycznych dodano liczniki wysyłanych i odbieranych pakietów. Informacje te były następnie agregowane przez oprogramowanie G-MESH, które prezentowało przebiegi PDR w funkcji czasu oraz w funkcji liczby węzłów.

5.6.4 Zużycie energii przez pojedynczy węzeł

Zużycie energii pojedynczego węzła określano poprzez pomiar natężenia prądu pobieranego przez węzeł w różnych stanach pracy (wybudzenie, pomiar, transmisja, uśpienie) oraz wyznaczenie mocy chwilowej i energii zużywanej w całym cyklu pracy. Pomiary realizowano za pomocą modułu Power Profiler Kit nRF6707, współpracującego z aplikacją NRF Connect, co umożliwiło obserwację przebiegu prądu w czasie, porównanie energochłonności różnych scenariuszy pracy algorytmu oraz weryfikację założeń bilansu energetycznego przyjętego na etapie projektowania węzła.

5.7 Podsumowanie rozdziału

W rozdziale przedstawiono kompletny proces projektowania oraz implementacji prototypowej sieci sensorycznej, obejmujący koncepcję funkcjonalną sieci monitorującej sekcje obudowy zmechanizowanej, architekturę pojedynczego węzła oraz kryteria doboru modułów radiowych, a także wybór i uzasadnienie topologii kratowej sieci. Opisano strukturę stanowisk badawczych dla sieci 3- i 30-węzłowej, implementację oprogramowania węzłów nRF52 z wykorzystaniem stosu FruityMesh, opracowanie oprogramowania pośredniczącego na mikrokomputerach Raspberry Pi oraz aplikacji G-MESH służącej do wizualizacji, archiwizacji i analizy danych. Przedstawiono również metodykę pomiaru kluczowych parametrów sieci, takich jak czas dotarcia pakietu, przepustowość, współczynnik PDR oraz zużycie energii. Tak przygotowane środowisko walidacyjne umożliwia nie tylko eksperymentalną ocenę opracowanego algorytmu trasowania, lecz także stanowi bazę do dalszych badań nad optymalizacją energetyczną i niezawodnością bezprzewodowych sieci sensorycznych w warunkach zbliżonych do realiów pracy kopalni głębinowej. W kolejnym rozdziale przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych uzyskane z wykorzystaniem opisanego stanowiska.

6. Badania eksperymentalne prototypowej sieci sensorycznej

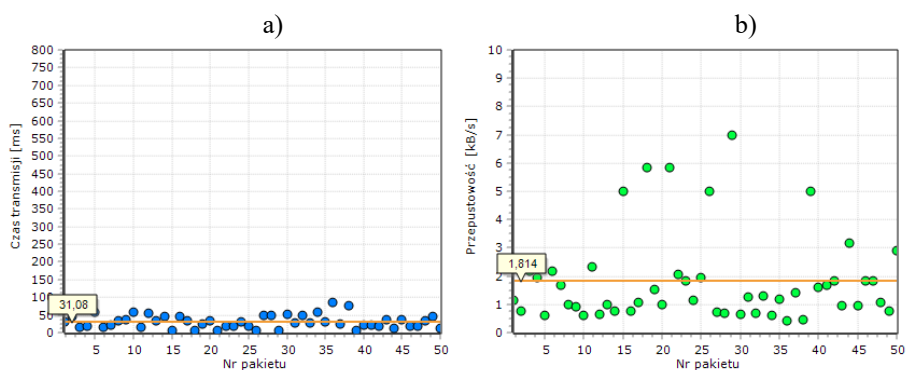
W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych dla zaprojektowanej sieci sensorycznej oraz opracowanego algorytmu trasowania, opisanego w rozdziałach 4 i 5. Celem testów było zweryfikowanie możliwości praktycznej implementacji algorytmu w rzeczywistej infrastrukturze sprzętowej oraz ocena jego wpływu na kluczowe parametry pracy sieci: czas dotarcia pakietu do miejsca docelowego, przepustowość, współczynnik pewności dostarczenia danych (PDR) oraz zużycie energii przez pojedyncze węzły.

Badania wykonano w dwóch etapach. W pierwszym etapie zweryfikowano działanie algorytmu w modelu sieci 3-węzłowej, co pozwoliło ocenić wpływ poszczególnych algorytmów rojowych (PSO, ACO, BA) na parametry transmisji przy niewielkiej liczbie węzłów. W drugim etapie przeprowadzono badania prototypu sieci złożonej z 5–30 węzłów, obejmujące zarówno węzły statyczne, jak i scenariusze z węzłami ruchomymi, a także analizę statystyczną zarejestrowanych wyników.

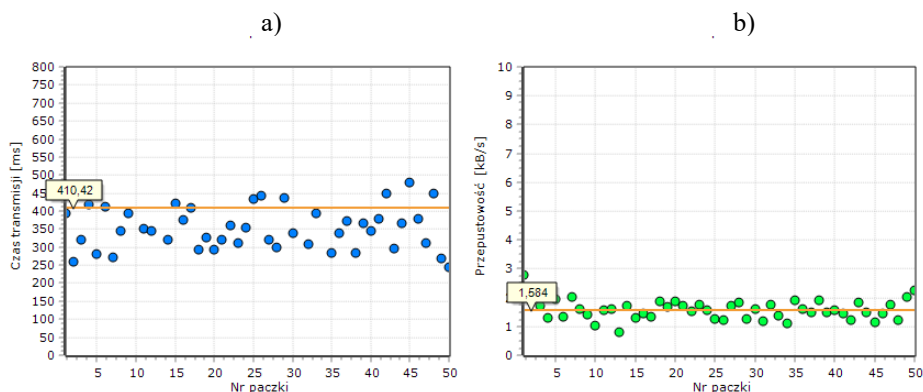
6.1 Badania modelu sieci sensorycznej – struktura 3-węzłowa

W pierwszym etapie zbudowano model sieci sensorycznej złożonej z trzech węzłów: jednego węzła typu SINK oraz dwóch węzłów typu NODE. Model został opracowany na bazie stosu FruityMesh i pozwalał na implementację trzech wariantów algorytmu trasowania opartych odpowiednio na optymalizacji rojem cząstek (PSO), algorytmie mrówkowym (ACO) oraz algorytmie pszczelim (BA). Dla każdego wariantu przeprowadzono serię pomiarów czasu dotarcia pakietu, przepustowości oraz poboru prądu przez węzeł typu NODE.

Na rysunku 54 przedstawiono przykładowe wyniki walidacji algorytmu trasowania dla prototypu sieci 3-węzłowej, obejmujące przebieg czasowy wartości czasu dotarcia pojedynczego pakietu do miejsca docelowego oraz czas dostarczenia całej paczki pakietów. Rysunek 55 ilustruje z kolei przebiegi przepustowości dla pojedynczych pakietów i paczek pakietów przy zastosowaniu analizowanych algorytmów.



Rys. 54. Wyniki walidacji algorytmu trasowania prototypowej sieci sensorycznej - dane pojedynczego pakietu transmitowanego z węzła typu NODE do węzła typu SINK:
a) czas dotarcia pakietu do miejsca docelowego, b) przepustowość sieci



Rys. 55. Wyniki walidacji algorytmu trasowania prototypowej sieci sensorycznej - dane paczki danych składających się z 10 pakietów transmitowanych z węzła typu NODE do węzła typu SINK: a) czas dotarcia pakietu do miejsca docelowego, b) przepustowość sieci

Wartości zestawione na rysunkach 54 oraz 55 zarejestrowano dzięki zastosowaniu autorskiego oprogramowania do monitoringu procesu walidacji algorytmu trasowania, które zostało opracowane na potrzeby badań przez Autora pracy. Dane pozyskane z testów wszystkich algorytmów (tj. uśrednione czasy dotarcia pakietu z węzła typu NODE, do węzła typu SINK) przedstawiono w tabeli 7.

Uśrednione wartości czasów dotarcia pakietu z węzła typu NODE do węzła typu SINK

Tabela 7.

Lp.	Algorytm trasowania	Czas dotarcia pakietu [ms]
1	Optymalizacji rojem cząstek	31 pakiet; 410 paczka
2	Mrówkowy	28 pakiet; 390 paczka
3	Pszczeli	35 pakiet; 430 paczka

Uzyskane wartości przepustowości badanej sieci sensorycznej z implementacją poszczególnych algorytmów trasowania przedstawiono w tabeli 8.

Uśrednione wartości przepustowości sieci z węzła typu NODE do węzła typu SINK

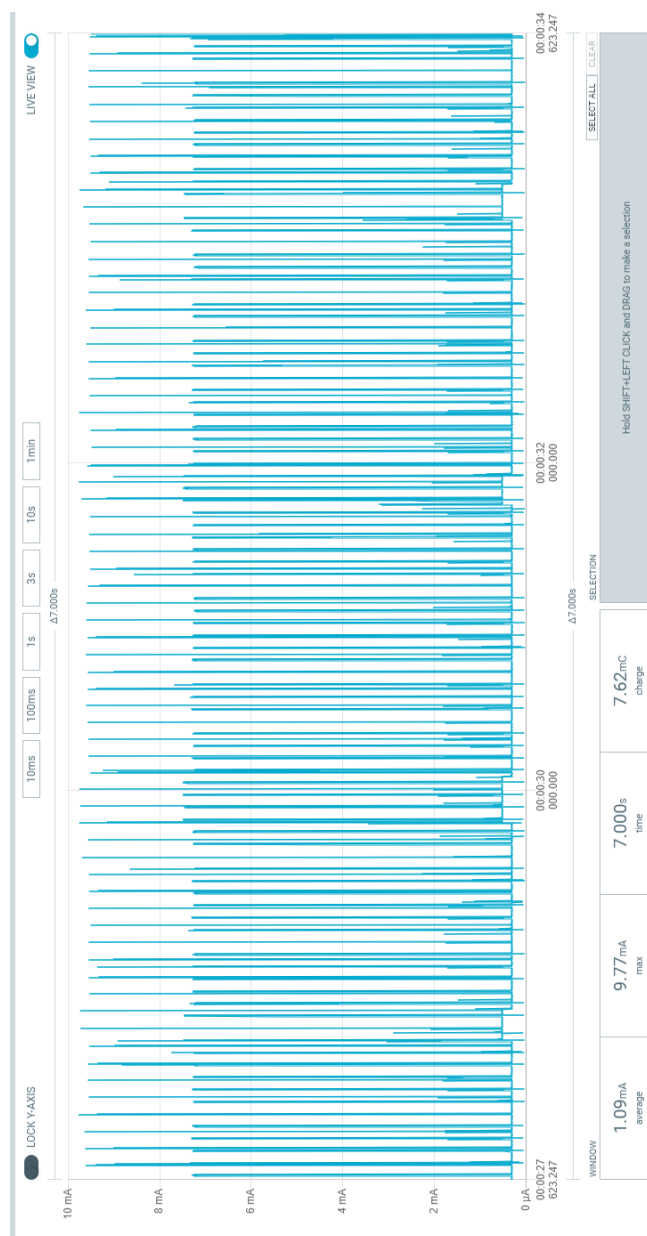
Tabela 8.

Lp.	Algorytm trasowania	Przepustowość [kB/s]
1	Optymalizacji rojem cząstek	1.7
2	Mrówkowy	2
3	Pszczeli	1.6

Wartość parametru pewności dostarczenia danych do odbiorcy PDR wszystkich algorytmów wynosiła 100%.

Węzeł typu NODE został wyposażony w moduł pomiaru natężenia prądu, co umożliwiło ocenę energochłonności w trakcie pracy sieci. Dla każdego z analizowanych algorytmów wykonano pomiary poboru prądu podczas realizacji procedury przesyłania danych. Na rysunku 56 przedstawiono przebieg natężenia prądu pobieranego przez elektronikę węzła w trzech podstawowych stanach: oczekiwania, transmisji danych oraz uśpienia. Średnia wartość prądu, wyznaczona dla każdego z testowanych algorytmów, wynosiła około 1 mA, co potwierdza, że przyjęta architektura sprzętowa jest zgodna z założeniami niskoenergetycznej pracy węzłów.

Analiza wyników badań wykazała, że wartości rozpatrywanych kryteriów jakości transmisji różniły się jedynie nieznacznie pomiędzy poszczególnymi algorytmami oraz względem algorytmu bazowego (reaktywnego) wbudowanego w sieć FruityMesh.



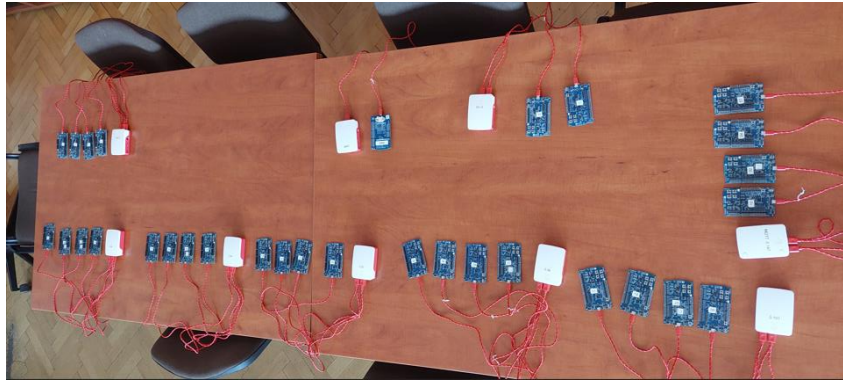
Rys. 56. Wykres poboru prądu węzła typu NODE modelu sieci sensorycznej

W przypadku czasu dotarcia pojedynczych pakietów dane różnice mieściły się w zakresie pojedynczych milisekund, natomiast dla czasu dostarczenia całych paczek danych osiągały rząd kilkudziesięciu milisekund. Podobnie, zmiany uzyskiwanej przepustowości zawierały się w granicach kilkunastu dziesiątych kB/s, co wskazuje, że z punktu widzenia parametrów sieciowych wszystkie rozwiązania zapewniają porównywalny poziom jakości obsługi ruchu.

Istotnym wnioskiem z badań jest natomiast ocena złożoności obliczeniowej poszczególnych algorytmów oraz ich skalowalności. W dalszych pracach zrezygnowano z wykorzystania algorytmu pszczelego, ponieważ charakteryzował się on najdłuższymi czasami realizacji procedury wyboru optymalnej ścieżki, przy czym dla bardziej rozbudowanych sieci obserwowano tendencję do wykładniczego wzrostu czasu obliczeń. Proces implementacji algorytmów w modelu sieci pokazał również, że w przypadku algorytmów mrówkowego i pszczelego występuje ryzyko powstawania zapętleń ścieżek – wybór „najlepszego” sąsiada przez węzeł typu NODE nie zawsze gwarantuje dostarczenie informacji do węzła docelowego. W algorytmie mrówkowym każdy węzeł musi na bieżąco obliczać i aktualizować wartości prawdopodobieństwa tras na podstawie śladów feromonowych, co generuje dodatkowe obciążenie obliczeniowe (szczególnie w dużych sieciach). Analogicznie, w algorytmie pszczelim węzeł musi przetwarzać informacje napływające od pozostałych węzłów (pszczoty-zwiadowcy, robotnice) oraz obliczać atrakcyjność konkurencyjnych tras, co również intensywnie wykorzystuje zasoby procesora.

W obydwu podejściach konieczne jest dodatkowo przechowywanie informacji o wielu możliwych trasach oraz ich parametrach – w przypadku ACO są to wartości feromonów, natomiast w przypadku BA – charakterystyki „źródeł pożywienia”. Powoduje to zauważalne zapotrzebowanie na pamięć operacyjną. Dla prostych mikrokontrolerów stosowanych w węzłach bateryjnych, pracujących w sieciach o większej liczbie węzłów, stanowi to istotne ograniczenie praktyczne. Z tego względu jako kierunek dalszych prac, przyjęto zastosowanie algorytmu opartego na optymalizacji rojem cząstek (PSO) z wykorzystaniem wybranych elementów algorytmu mrówkowego, zgodnie z koncepcją opisaną w rozdziale 4.2. Przeprowadzone na modelu sieci sensorycznej eksperymenty numeryczne stanowią tym samym podstawę do zaprojektowania i przebadania prototypu sieci obejmującej co najmniej 30 węzłów.

zarządzanie węzłami. Do każdego komputera Raspberry Pi dołączono za pomocą interfejsu USB cztery moduły radiowe nRF52 (rys. 58). Tak zbudowana struktura pozwoliła na emulację pracy sieci zbliżonej skalą do rzeczywistego systemu monitoringu fragmentu ściany wydobywczej.



Rys. 58. Widok konfiguracji sprzętowej prototypu sieci sensorycznej - badania węzłów statycznych

Dla każdej konfiguracji liczby węzłów (5, 10, 20, 30) rejestrowano parametry pracy sieci przy przesyłaniu 100 oraz 1000 pakietów danych. Zestawienie wyników pomiarów dla pojedynczego węzła (informacje PSO przesyłane w ramach połączeniowych) zamieszczono w tabeli 9. Tabela zawiera liczby węzłów w sieci, liczbę wysłanych pakietów, średni czas dotarcia pakietu do miejsca docelowego, współczynnik PDR oraz przepustowość BDR wyrażoną w kB/s.

Dane uzyskane w przypadku pojedynczego węzła (informacje PSO przesyłane w ramach połączeniowych)

Tabela 9.

Lp.	Liczba węzłów w sieci sensorycznej	Liczba wysłanych pakietów danych	Czas dotarcia pakietu do miejsca docelowego [ms]	Pewność dostarczenia danych do odbiorcy PDR [%]	Przepustowość BDR [kB/s]
1	5	100	46	94	5,3
2	5	1000	48	94	5,2
3	10	100	167	96	1,44
4	10	1000	132	94	1,75
5	20	100	342	97	0,67
6	20	1000	248	96	0,97
7	30	100	463	98	0,4
8	30	1000	367	97	0,6

W przypadku pakietów wysyłanych w sieci składającej się z 5 węzłów średnia przepustowość kształtowała się w zakresie 5 kB/s, natomiast średnie czasy dotarcia pakietu do miejsca docelowego mieściły się w przedziale od 46 ms (100 wysłanych pakietów) do 48 ms (1000 wysłanych pakietów).

W przypadku sieci składającej się z 10 węzłów, czas dotarcia pakietów wynosił 167 ms przy rejestracji 100 wysłanych pakietów, z pewnością dostarczenia danych na poziomie 96% oraz przepustowością rzędu 1,44 kB/s. Przy rejestracji 1000 pakietów, czas dotarcia wynosił 132 ms, przepustowość natomiast 1,75 kB/s, a współczynnik PDR wynosił blisko 94%.

W przypadku pakietów wysyłanych w sieci składającej się z 20 węzłów zaobserwowano wzrost wartości czasu dostarczenia pakietu do miejsca docelowego oraz spadek przepustowości. Sieć wykazywała również większe zróżnicowanie czasowe pomiędzy rejestracjami kolejnych czasów dotarcia pakietu do miejsca docelowego. Ta sytuacja była spowodowana częstą rekonfiguracją połączeń z sąsiadami, co wiązało się ze zmianą ścieżki transmisji danych.

Podobna sytuacja miała miejsce przy zwiększeniu liczby węzłów sieci do 30. Zaobserwowano wydłużenie czasów dotarcia pakietów oraz niższą przepustowość, a zróżnicowanie czasowe pomiędzy kolejnymi pakietami również uległo zwiększeniu.

Kolejne iteracje, w których zmodyfikowano sposób wysyłania ramek NODE_PSO_INFO oraz SINK_PSO_INFO (ramki zostały wysyłane jako pakiety reklamowe protokołu Bluetooth, czyli jako ramki przed połączeniowe), zostały przedstawione w tabeli 10.

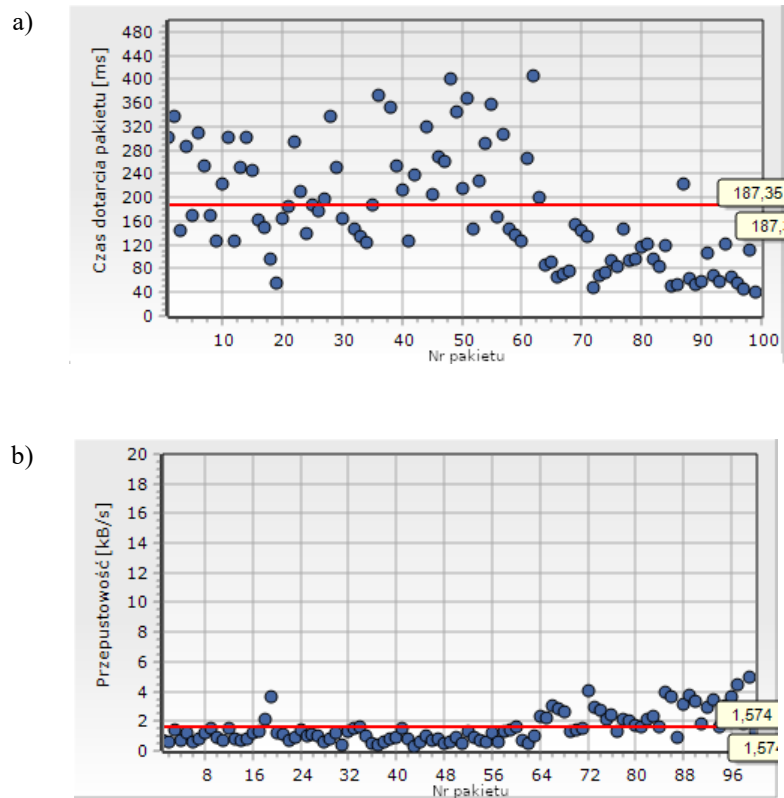
Dane uzyskane w przypadku pojedynczego węzła (informacje PSO przesłane w ramach przedpołączeniowych, tzw. advertiment)

Tabela 10.

Lp.	Liczba węzłów w sieci sensorycznej	Liczba wysłanych pakietów danych	Czas dotarcia pakietu do miejsca docelowego [ms]	Pewność dostarczenia danych do odbiorcy PDR [%]	Przepustowość BDR [kB/s]
1	5	100	46	94	5,3
2	5	1000	48	93	5,2
3	10	100	187	99	1,6
4	10	1000	151	94	1,6
5	20	100	199	96	3,1
6	20	1000	119	96	2,1
7	30	100	156	97	2,0
8	30	1000	162	97	1,7

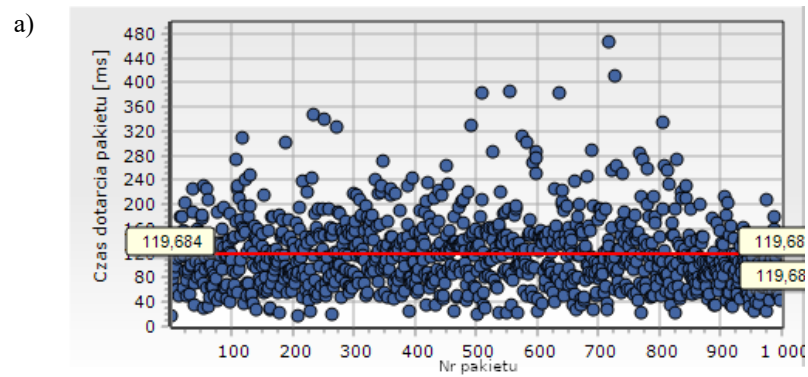
W przypadku pakietów wysyłanych w sieci składającej się z 5 węzłów wartości poszczególnych parametrów pozostały niezmiennie. Natomiast w przypadku sieci składającej się z 10, 20 oraz 30 węzłów udało się zwiększyć średnią przepustowość do wartości z przedziału 1,6-3,1 kB/s oraz skrócić średnie czasy dotarcia pakietu do miejsca docelowego w zakresie 119-199 ms.

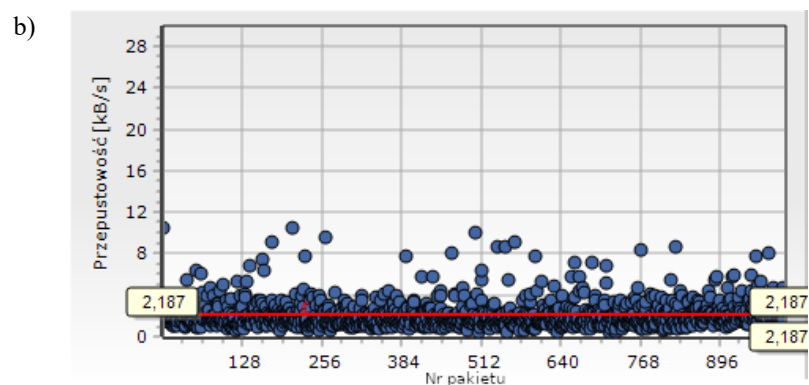
Na rysunkach 59-62 przedstawiono wybrane charakterystyki (czas dotarcia pakietów oraz przepustowość) uzyskane podczas walidacji prototypu sieci sensorycznej przy 100 oraz 1000 wysłanych pakietów.



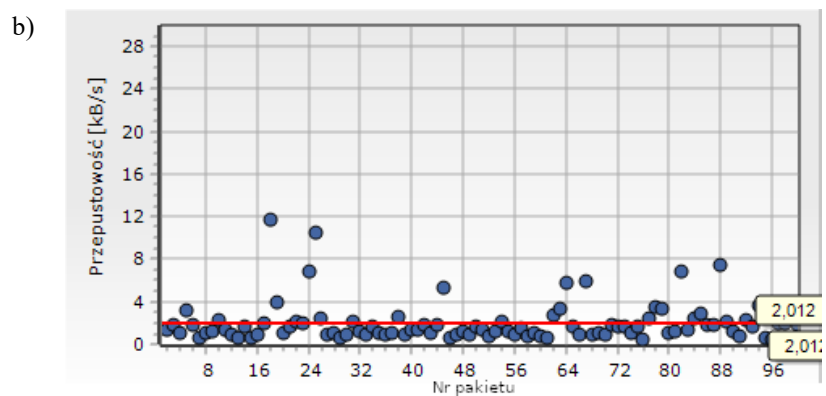
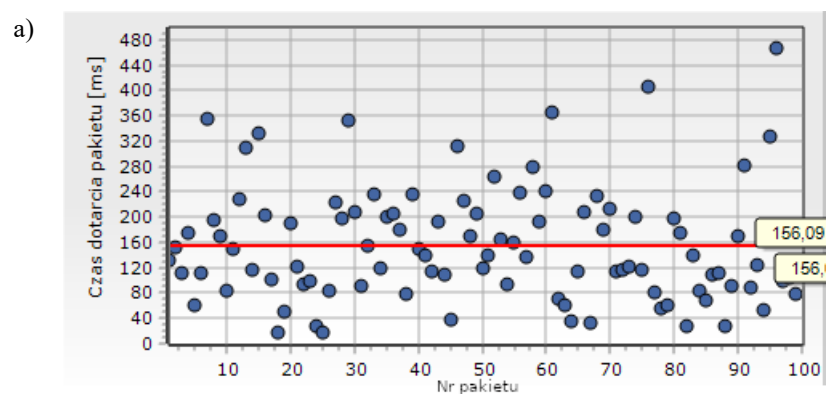
Rys. 59. Charakterystyki zarejestrowane przy wysłaniu 100 pakietów w prototypowej sieci sensorycznej z 10 węzłami:

a) czasu dotarcia pakietu do miejsca docelowego, b) przepustowości

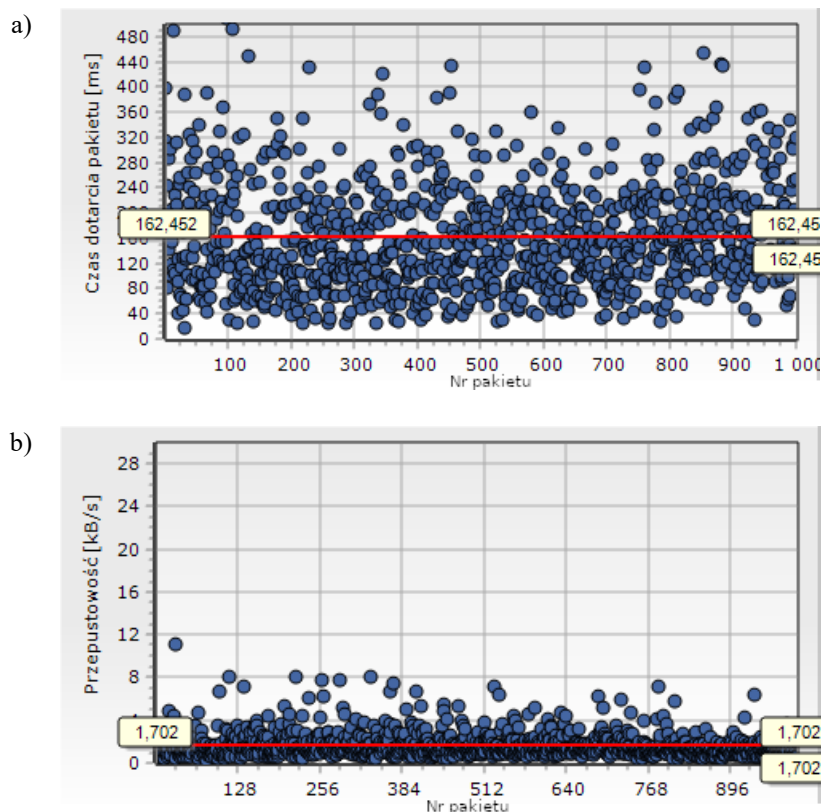




Rys. 60. Charakterystyki zarejestrowane przy wysłaniu 1000 pakietów w prototypowej sieci sensorycznej z 20 węzłami: a) czasu dotarcia pakietu do miejsca docelowego, b) przepustowości



Rys. 61. Charakterystyki zarejestrowane przy wysłaniu 100 pakietów w prototypowej sieci sensorycznej z 30 węzłami: a) czasu dotarcia pakietu do miejsca docelowego, b) przepustowości



Rys. 62. Charakterystyki zarejestrowane przy wysłaniu 1000 pakietów w prototypowej sieci sensorycznej z 30 węzłami:

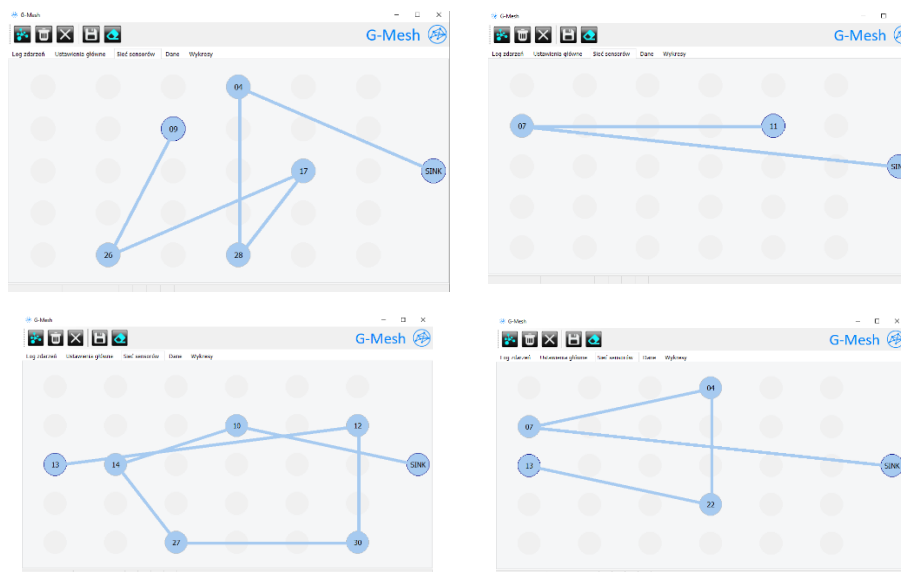
a) czasu dotarcia pakietu do miejsca docelowego, b) przepustowości

W sieci trzydziestowęzłowej konfiguracja połączeń pomiędzy poszczególnymi węzłami ulegała wielokrotnym zmianom w trakcie pracy. Jak wynika z analizy zarejestrowanych danych, uśredniony czas dostarczenia pakietów w skali całej sieci rośnie wraz ze zwiększaniem liczby aktywnych węzłów, co jest zgodne z obserwacjami przedstawionymi w rozdziale 3 dla sieci symulacyjnych.

Dodatkowo wykonano serię badań dotyczących procesu rekonfiguracji sieci, analizując jej zachowanie w sytuacjach awaryjnych oraz podczas dołączania nowych węzłów. Symulowano zarówno uszkodzenie pojedynczego węzła, jak i włączenie dodatkowego modułu do już pracującej struktury. Zarejestrowany czas rekonfiguracji sieci mieścił się w przedziale 10–20 sekund, po czym sieć odzyskiwała pełną zdolność transmisji, adaptując się do zmienionej topologii bez obserwowanych błędów działania.

W celu weryfikacji stabilności transmisji w obecności węzłów ruchomych opracowano dodatkową obudowę modułów nRF52, umożliwiającą ich mocowanie na pasku osoby przemieszczającej się w przestrzeni. Przeprowadzone testy potwierdziły poprawne funkcjonowanie sieci z węzłami mobilnymi – informacje generowane przez węzły typu NODE były prawidłowo dostarczane do węzła typu SINK, przy zachowaniu niezmiennych, z punktu widzenia analizy, wartości podstawowych parametrów transmisji danych. Należy podkreślić, że zmiany położenia węzłów miały charakter powolny i ograniczony. W badanym przypadku nie zakładano wykorzystania algorytmów trasowania przeznaczonych dla sieci o silnie dynamicznej topologii, gdyż nie odpowiada to docelowym warunkom eksploatacji projektowanego systemu. Celem testów było jedynie potwierdzenie stabilności transmisji przy niewielkich zmianach odległości pomiędzy węzłami, mogących odpowiadać drobnym przemieszczeniom elementów zabudowy lub urządzeń pomiarowych.

Na rysunku 63 przedstawiono przykładowe zarejestrowane ścieżki transmisji danych w sieci składającej się z 30 węzłów. Należy zaznaczyć, że graficzne rozmieszczenie węzłów na diagramach nie odpowiada ich rzeczywistym pozycjom w przestrzeni; schemat ma charakter poglądowy i służy wyłącznie ułatwieniu interpretacji przebiegu tras pakietów danych.

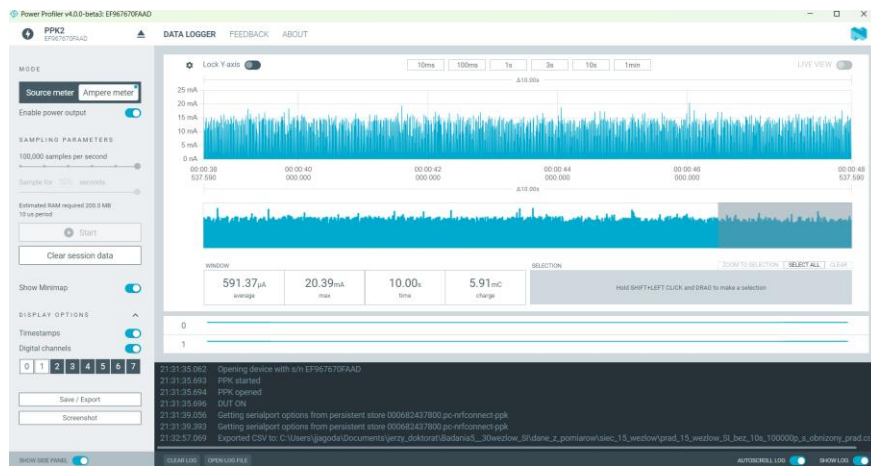


Rys. 63. Przykładowe ścieżki pakietów danych w prototypowej sieci sensorycznej składającej się z 30 węzłów

W trakcie badań zaobserwowano, że w niektórych przypadkach pakiety danych były kierowane do bardziej odległych węzłów typu NODE, mimo fizycznej bliskości węzła typu SINK. Zjawisko to wynika z faktu, że w przyjętej implementacji odległość pomiędzy węzłami jest estymowana pośrednio – na podstawie poziomu mocy sygnału odbieranego (RSSI). Przy bardzo małych odległościach, rzędu kilku centymetrów, interpretacja dystansu wyłącznie na podstawie RSSI obarczona jest istotnym błędem, co sprzyja wyborowi tras, które nie zawsze są zgodne z rzeczywistą geometrią rozmieszczenia węzłów. W praktyce, przy tak niewielkich odległościach, nie przekłada się to jednak w istotny sposób na czas dostarczenia pakietu do miejsca docelowego. Dopiero w sytuacjach, w których wymagane byłoby wyznaczanie odległości z dokładnością rzędu 1 cm, należałoby rozważyć zastosowanie dodatkowych modułów lokalizacyjnych opartych na technice UWB (Ultra Wideband), pozwalających na precyzyjniejszą estymację położenia.

Pomiary natężenia prądu w wybranych węzłach sieci nie wykazały zauważalnych różnic po wprowadzeniu zmodyfikowanego algorytmu trasowania – wartości zużycia energii pozostawały zbliżone do parametrów rejestrowanych w sieci pracującej bez tej modyfikacji. Na bilans energetyczny pojedynczego węzła w największym stopniu wpływa czas przebywania w trybie reklamowym (advertisement) oraz przyjęty poziom mocy nadawczej sygnału radiowego. Zastosowany algorytm pełni jednak istotną rolę ochronną przed tzw. drenażem energetycznym, który mógłby wystąpić w sytuacjach wielokrotnej retransmisji pakietów niedostarczanych do odbiorcy. Utrzymanie wysokich wartości współczynnika PDR ogranicza liczbę koniecznych powtórzeń transmisji, a tym samym sprzyja wydłużeniu czasu pracy węzłów zasilanych bateryjnie.

Dodatkowo, dzięki odpowiedniej regulacji poziomu RSSI oraz czasu trwania procesu reklamowania węzłów, uśrednioną wartość natężenia prądu udało się obniżyć do około 0,6 mA, co ilustrują wyniki przedstawione na rysunku 64.



Rys. 64. Charakterystyka zużycia energii przez pojedynczy węzeł sieci typu NODE

Wraz ze zwiększaniem liczby węzłów w sieci obserwowano systematyczny spadek przepustowości oraz wydłużenie czasu potrzebnego na dostarczenie pakietów danych. Dla konfiguracji obejmujących 10, 20 i 30 węzłów wartości przepustowości stabilizowały się w przedziale od około 0,8 do 2,5 kB/s, co należy uznać za charakterystyczne dla badanej klasy rozwiązań i przyjętych parametrów pracy. Równolegle przeprowadzono badania procesu rekonfiguracji sieci, analizując jej zachowanie w przypadku uszkodzenia lub dołączenia pojedynczego węzła. Czas adaptacji do nowej topologii mieścił się w przedziale 10–20 sekund, po czym sieć odzyskiwała pełną zdolność transmisji bez oznak niestabilności działania.

Dodatkowo potwierdzono poprawne funkcjonowanie sieci w obecności węzłów ruchomych. Zmiany położenia wybranych modułów nie powodowały pogorszenia jakości transmisji – informacje z węzłów typu NODE były skutecznie dostarczane do węzła typu SINK przy zachowaniu wymaganych parametrów komunikacyjnych. Pomiary natężenia prądu nie wykazały istotnych różnic po zaimplementowaniu opracowanego algorytmu trasowania, jednak dzięki utrzymaniu wysokiego współczynnika PDR zredukowano liczbę retransmisji, a tym samym ograniczono całkowite zapotrzebowanie energetyczne węzłów. Przekłada się to bezpośrednio na wydłużenie czasu pracy sieci przy zasilaniu bateryjnym.

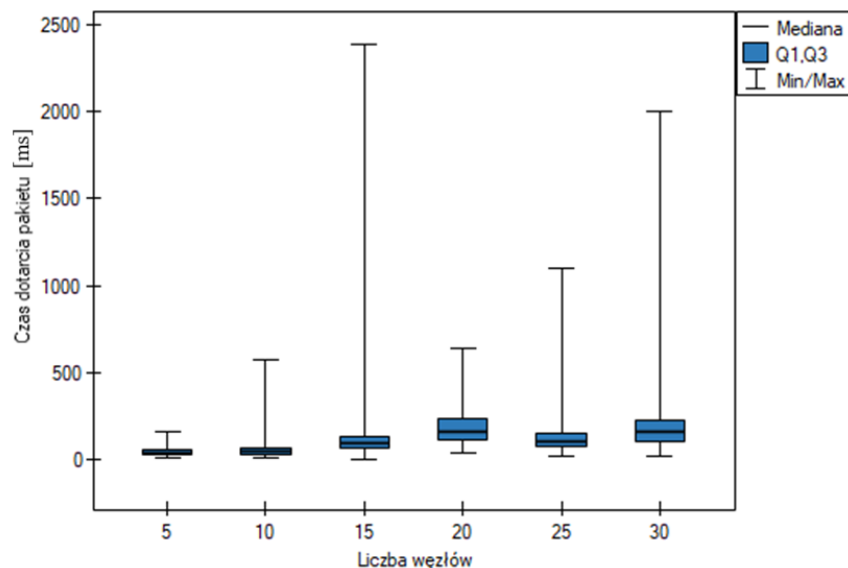
W kolejnym rozdziale przedstawiono szczegółową analizę statystyczną zarejestrowanych wartości dla poszczególnych kryteriów oceny pracy sieci, co

pozwała na pełniejsze ujęcie zależności pomiędzy topologią, algorytmem trasowania a uzyskiwanymi parametrami eksploatacyjnymi.

6.3 Analiza statystyczna parametrów sieci

W celu dokładniejszego scharakteryzowania badanego procesu zebrane dane pomiarowe poddano analizie statystycznej z wykorzystaniem programu PQStat. Ze względu na brak normalności rozkładów dla analizowanych zmiennych zdecydowano o zastosowaniu nieparametrycznej analizy wariancji ANOVA Kruskala–Wallisa. Porównania wykonano oddzielnie dla każdego z kryteriów, uwzględniając kolejne konfiguracje liczby węzłów w sieci sensorycznej: 5, 10, 15, 20, 25 oraz 30.

Uzyskane wyniki wskazują, że pomiędzy poszczególnymi konfiguracjami sieci występują istotne statystycznie różnice analizowanych metryk. W szczególności potwierdzono wzrost wartości średniej czasu dotarcia pakietu do miejsca docelowego wraz ze zwiększaniem liczby węzłów, przy czym – jak ilustruje rysunek 65 – wartość ta ulega stabilizacji na poziomie około 160 ms.

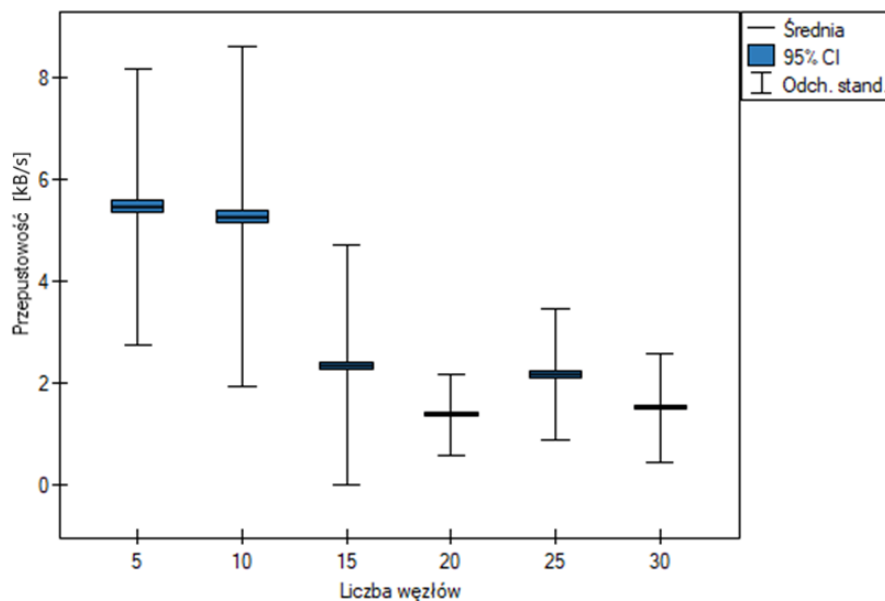


Rys. 65. Analiza czasu dotarcia pakietu do miejsca docelowego sieci sensorycznych o różnej liczbie węzłów wykonana metodą ANOVA Kruskala-Wallisa

Analiza danych przedstawionych na rysunku 65 pokazuje, że dla niektórych konfiguracji pojawiają się wartości maksymalne znacznie odbiegające od

mediany czasu dotarcia pakietu do miejsca docelowego. Można przyjąć, że pojedyncze tak wysokie wartości są związane z sytuacjami, w których w trakcie transmisji następowała rekonfiguracja sieci, co chwilowo wydłużało czas obsługi pakietu.

Równocześnie, wyniki zilustrowane na rysunku 66 potwierdzają, że wraz ze wzrostem liczby węzłów sieci sensorycznej obserwowany jest wyraźny spadek przepustowości. Zjawisko to jest zgodne z oczekiwaniami dla sieci wieloskokowych, w których zwiększenie liczby elementów uczestniczących w transmisji skutkuje większym obciążeniem kanału oraz większą liczbą kolizji i retransmisji.

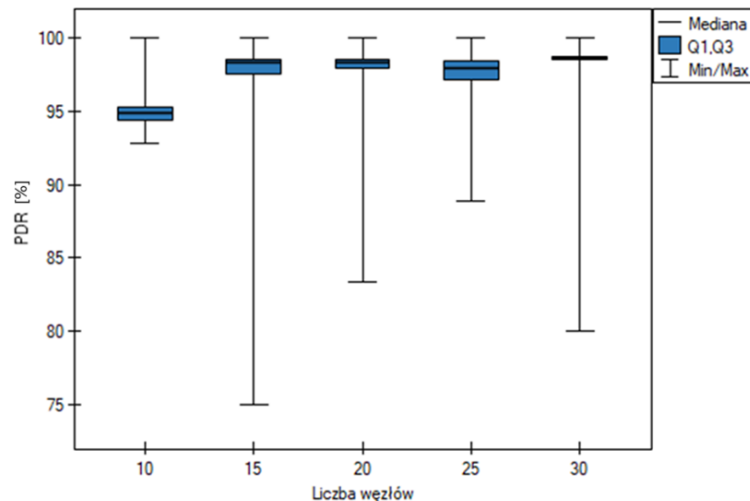


Rys. 66. Analiza przepustowości sieci sensorycznej o różnej liczbie węzłów wykonana metodą ANOVA Kruskala-Wallisa

Dla niewielkiej liczby węzłów (5 lub 10) przepustowość utrzymuje się na relatywnie wysokim poziomie, rzędu około 6 kB/s. Po przekroczeniu progu 10 węzłów następuje wyraźny spadek wartości tego parametru, a dla konfiguracji obejmujących od 20 do 30 węzłów stabilizuje się on na poziomie około 2 kB/s. Jednocześnie wraz ze wzrostem liczby węzłów obserwuje się zwiększanie odchylenia standardowego oraz szerokości przedziału ufności, co wskazuje na mniejszą stabilność pracy sieci i większe zróżnicowanie uzyskiwanych wartości przepustowości przy bardziej rozbudowanej topologii.

Na rysunku 67 przedstawiono wyniki analizy współczynnika PDR sieci sensorycznej o różnej liczbie węzłów, przeprowadzonej z wykorzystaniem testu ANOVA Kruskala–Wallisa.

Podczas walidacji procesu transmisji danych pomiarowych zaobserwowano także okresowe obniżenia wartości współczynnika PDR.



Rys. 67. Analiza współczynnik PDR sieci sensorycznej o różnej liczbie węzłów wykonana metodą ANOVA Kruskala–Wallisa

Analiza informacji rejestrowanych przez węzeł SINK, dotyczących wyboru sąsiadów przez poszczególne węzły typu NODE, pozwoliła na identyfikację sytuacji, w których w sieci pojawiały się zapętlenia tras, prowadzące do niedostarczenia pakietów do węzła wyjściowego. Przykładowy przypadek ilustruje rysunek 68.

```
895523
895524
895525
895526 2 positionN: 1 position[29]: 37 NumOfNeighbours: 5 Nodes that cannot reach the sink: 5 4 28 20 27 18 19 Dla [0] ID: 25 Neigh: 7
895527
895528
```

Rys. 68. Przypadek wykrycia zapętlenia w sieci

Aby wyeliminować zidentyfikowane nieprawidłowości, w węzle typu SINK wprowadzono mechanizm oceny wyznaczonych ścieżek przesyłu pakietów danych. Jeżeli pakiet nie dotarł do węzła SINK, wartość zwracana przez funkcję oceny danej trasy była odpowiednio obniżana. Dzięki tej modyfikacji algorytm stopniowo preferował ścieżki, które skutecznie prowadziły pakiety do węzła nadrzędnego, co pozwoliło na wyznaczenie takich dróg transmisji, przy których dane ze wszystkich węzłów typu NODE docierały do węzła typu SINK.

W dalszej części badań przeprowadzono walidację algorytmu trasowania opartego na inteligencji roju (SI), dążąc do uzyskania możliwie najlepszych parametrów pracy sieci sensorycznej. Ocenę wyników zrealizowano z wykorzystaniem testu U Manna-Whitneya, porównując sieć pracującą z algorytmem SI z siecią wykorzystującą algorytm bazowy, niewykorzystujący mechanizmów inteligencji rojowej.

Analizie poddano w szczególności czasy dotarcia pakietów do miejsca docelowego, przepustowość sieci oraz wartości współczynnika PDR, porównując te parametry dla obu algorytmów przy liczbie węzłów równej odpowiednio 5, 10, 15, 20, 25 oraz 30. Ze względu na brak normalnego rozkładu uzyskanych danych zastosowano nieparametryczny test U Manna-Whitneya, odpowiedni dla tego typu zbiorów pomiarowych, przyjmując poziom istotności równy 0,05. W tabeli 11 zestawiono wyniki porównania czasów dotarcia pakietu dla obu algorytmów w konfiguracji sieci złożonej z 5 węzłów.

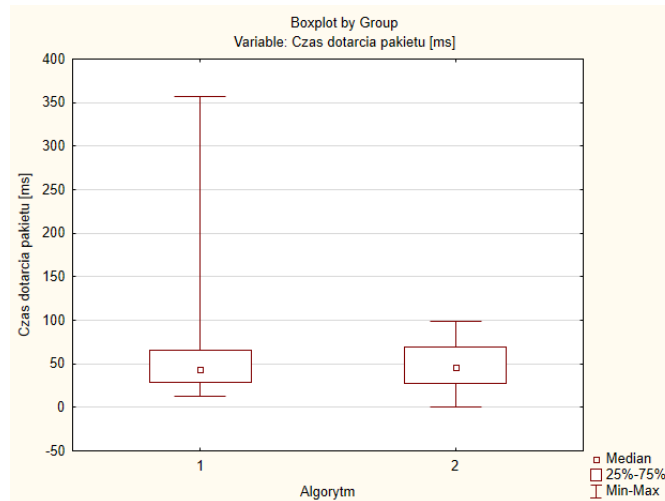
Porównanie czasów dotarcia pakietu dwóch algorytmów przy sieci składającej się z 5 węzłów, gdzie: Z – standaryzowana wartość testu Manna-Whitney’a (statystyka testowa), p – prawdopodobieństwo otrzymania takiego (lub bardziej skrajnego) wyniku testu jak został zaobserwowany, przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa (prawdopodobieństwo testowe)

Tabela 11.

Parametr	Czas dotarcia pakietu - 5 węzłów	
	Algorytm bez SI	Algorytm z SI
Średnia	50,879	48,012
Odchylenie standardowe	31,668	25,635
Wartość min	13	1
Wartość max	357	99
Test U Manna-Whitneya: Z = 0,272; p = 0,785		
Brak istotności		

Analiza z wykorzystaniem testu U Manna-Whitneya (rys. 69) wykazała, że różnice pomiędzy czasami dotarcia pakietów uzyskanymi dla algorytmu bazowego oraz algorytmu z wykorzystaniem inteligencji roju nie są statystycznie istotne. Oznacza to, że na podstawie zgromadzonych danych nie można jednoznacznie stwierdzić przewagi któregoś z rozwiązań pod względem przeciętnego czasu dostarczenia pakietu do węzła docelowego. Warto jednak

zauważyć, że algorytm z SI osiąga niższą wartość średnią czasu dotarcia pakietu oraz mniejsze odchylenie standardowe, co wskazuje na bardziej powtarzalne i spójne wyniki. Pomimo zbliżonych wartości mediany, wyniki uzyskane dla algorytmu z SI cechują się mniejszą zmiennością, podczas gdy algorytm bez SI wykazuje większy rozrzut czasów, w tym pojedyncze przypadki znacznie wydłużonego czasu dostarczenia pakietów.



Rys. 69. Charakterystyka rozkładu danych czasu dotarcia pakietu w sieci zbudowanej z 5 węzłów (gdzie: 1- algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

W tabeli 12 zestawiono porównanie przepustowości dwóch analizowanych algorytmów w przypadku badania sieci składającej się z 5 węzłów.

Porównanie przepustowości dwóch algorytmów w sieci składającej się z 5 węzłów, gdzie: Z – standaryzowana wartość testu Manna-Whitney’a (statystyka testowa), p - prawdopodobieństwo otrzymania takiego (lub bardziej skrajnego) wyniku testu jak został zaobserwowany, przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa (prawdopodobieństwo testowe,)

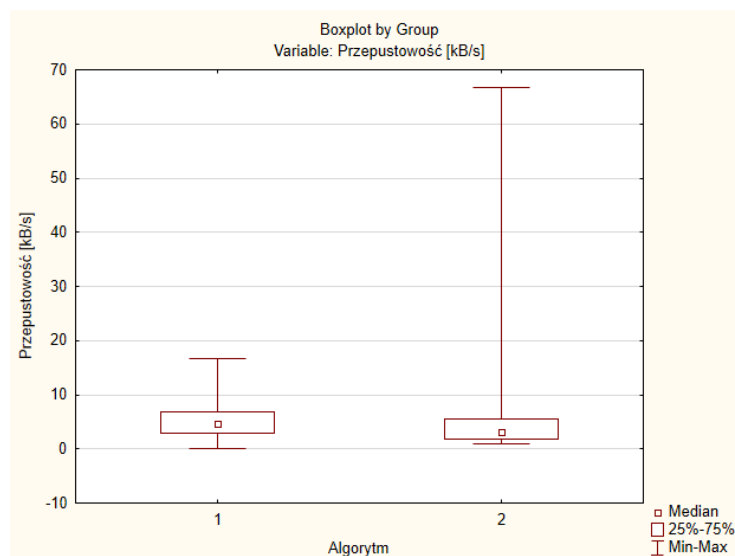
Tabela 12.

Parametr	Przepustowość - 5 węzłów	
	Algorytm bez SI	Algorytm z SI
Średnia	5,409	5,252
Odchylenie standardowe	3,393	7,020
Wartość min	0,012	1,02

Wartość max	16,667	66,667
Test U Manna-Whitneya: $Z = 14,628$; $p = 0,000$		
Istotnie statystycznie		

Test U Manna-Whitneya wykazał (rys. 70), że różnice w przepustowości pomiędzy algorytmem bez SI oraz algorytmem z SI są statystycznie istotne. Oznacza to, że na podstawie dostępnych danych można stwierdzić, że przepustowość różni się w sposób istotny w zależności od typu zastosowanego algorytmu. Średnie przepustowości w przypadku obydwu algorytmów są bardzo zbliżone, jednak algorytm bez SI ma nieco wyższą średnią przepustowość. Natomiast algorytm z SI cechuje się:

- większym odchyleniem standardowym - co wskazuje na wyższą tendencję do zmienności przepustowości,
- znacznie wyższą maksymalną wartością przepustowości - pomimo zbliżonych median obu algorytmów, algorytm z SI wykazuje potencjał do uzyskiwania wyższych przepustowości w warunkach, gdzie występują sprzyjające czynniki sieciowe, takie jak stabilne warunki transmisji, brak opóźnień związanych z przeciążeniem sieci, itp.



Rys. 70. Charakterystyka rozkładu przepustowości sieci zbudowanej z 5 węzłów (gdzie: 1- algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

W tabeli 13 zestawiono porównanie wskaźnika PDR dwóch analizowanych algorytmów w przypadku badania sieci składającej się z 5 węzłów.

Porównanie wartości PDR'a dwóch algorytmów w sieci składającej się z 5 węzłów, gdzie: Z – standaryzowana wartość testu Manna-Whitney'a (statystyka testowa), p - prawdopodobieństwo otrzymania takiego (lub bardziej skrajnego) wyniku testu jak został zaobserwowany, przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa (prawdopodobieństwo testowe)

Tabela 13.

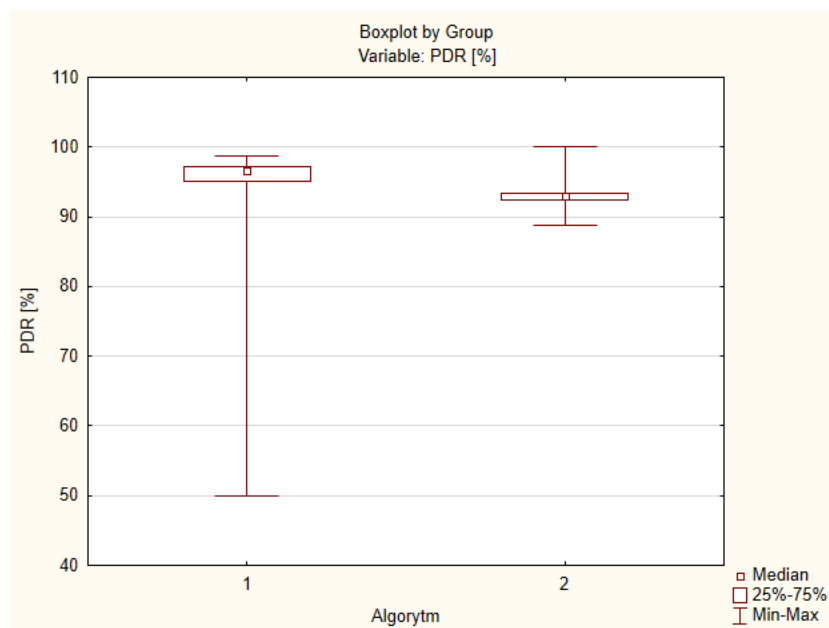
Parametr	PDR - 5 węzłów	
	Algorytm bez SI	Algorytm z SI
Średnia	96,138	93,100
Odchylenie standardowe	1,670	1,669
Wartość min	50,00	88,79
Wartość max	98,75	100
Test U Manna-Whitneya: $Z = 53,630$; $p = 0,000$		
Istotne statystycznie		

Test U Manna-Whitneya wykazał, że różnice we wskaźniku PDR między algorytmami są statystycznie istotne. Oznacza to, że na podstawie dostępnych danych można stwierdzić, że wskaźnik PDR różni się w sposób istotny w zależności od zastosowanego algorytmu.

Obydwa algorytmy wykazują zbliżoną wartość odchylenia standardowego, co sugeruje podobieństwo zmienności PDR. Algorytm bez SI cechuje się:

- wyższą średnią wartość omawianego wskaźnika - co wskazuje na większą pewność dostarczenia pakietów danych,
- znacznie niższą minimalną wartość wskaźnika PDR - co może sugerować występowanie sytuacji awaryjnych w sieci.

Ponadto, algorytm bez SI wykazuje wyższą medianę PDR (rys. 71), co oznacza, że w badanych przypadkach osiągnął bardzo wysoką skuteczność dostarczania pakietów. Jednak duża rozpiętość wartości może sugerować, że algorytm ten może mieć trudności w utrzymaniu wysokiego PDR w warunkach dużych opóźnień lub przeciążenia sieci.



Rys. 71. Charakterystyka rozkładu danych PDR w sieci zbudowanej z 5 węzłów (gdzie: 1- algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

Z kolei algorytm z SI charakteryzuje się mniejszą zmiennością wyników i bardziej stabilną skutecznością w dostarczaniu pakietów, co może czynić go bardziej niezawodnym w długotrwałych i stabilnych warunkach działania sieci. Jednocześnie algorytm z SI osiąga maksymalną wartość wskaźnika PDR równą 100, co oznacza dostarczanie wszystkich pakietów danych.

W tabeli 14 przedstawiono porównanie czasów dotarcia pakietu w odniesieniu do dwóch analizowanych algorytmów w sieci składającej się z 10 węzłów. Średni czas dotarcia pakietu w przypadku algorytmu bez SI wyniósł 141,839 ms, podczas gdy w przypadku algorytmu z SI kształtował się na poziomie 59,733 ms. Odchylenie standardowe w przypadku algorytmu bez SI wynosiło 69,056, co sugeruje większą zmienność czasów w porównaniu do algorytmu z SI, gdzie odchylenie standardowe wyniosło 36,001. Minimalny czas dotarcia pakietu wyniósł odpowiednio 43 ms (algorytm bez SI) i 2 ms (algorytm z SI), natomiast maksymalne wartości czasów odpowiednio 694 ms i 576 ms.

Porównanie czasów dotarcia pakietu dwóch algorytmów w sieci składającej się z 10 węzłów, gdzie: Z – standaryzowana wartość testu Manna-Whitney’a (statystyka testowa), p - prawdopodobieństwo otrzymania takiego (lub bardziej skrajnego) wyniku testu jak został zaobserwowany, przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa (prawdopodobieństwo testowe)

Tabela 14.

Parametr	Czas dotarcia pakietu - 10 węzłów	
	Algorytm bez SI	Algorytm z SI
Średnia	141,839	59,733
Odchylenie standardowe	69,056	36,001
Wartość min	43	2
Wartość max	694	576
Test U Manna-Whitneya: Z = 31,426; p = 0,000		
Istotne statystycznie		

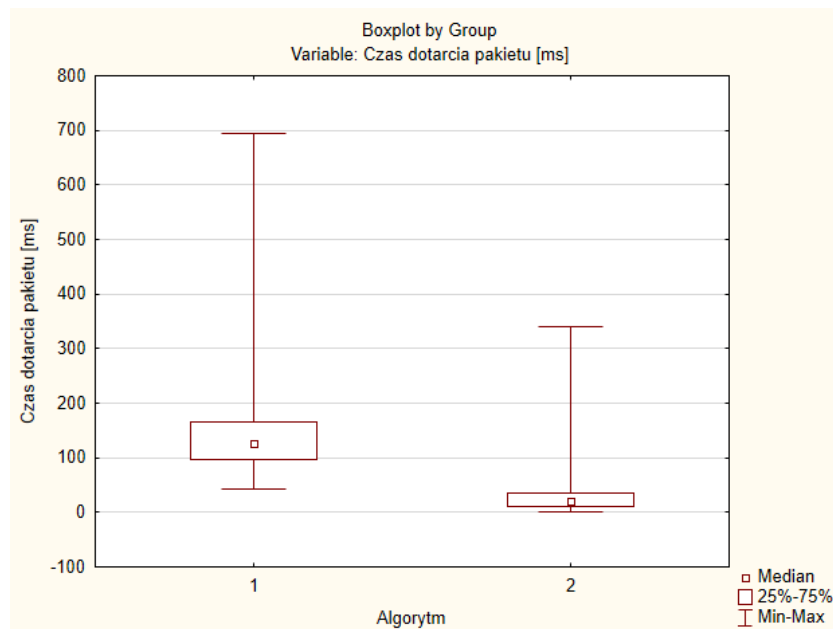
Test U Manna-Whitneya potwierdził, że różnice w czasie dotarcia pakietu w sieci składającej się z 10 węzłów pomiędzy algorytmami są istotne statystycznie. Ponadto, różnica w medianach pokazuje, że algorytm z SI jest wyraźnie bardziej wydajny, osiągając znacznie krótsze czasy dostarczenia pakietów (Rys. 72). Oznacza to, że zastosowanie algorytmu z SI:

- wpływa znacząco na redukcję czasu dotarcia pakietu,
- pozwala na osiągnięcie bardziej powtarzalnych wyników czasu dotarcia pakietów (mniejsze odchylenie standardowe),
- cechuje się lepszą wydajnością w różnych warunkach działania sieci – korzystniejsze maksymalne i minimalne wartości czasu dotarcia pakietu.

Następnie wykonano porównanie przepustowości dwóch algorytmów w sieci składającej się z 10 węzłów. W tabeli 15 przedstawiono wyniki tego porównania. Dla algorytmu bez zastosowania inteligencji roju (SI) średnia przepustowość wyniosła 1,671 kB/s, podczas gdy dla algorytmu z SI była ona wyższa i wyniosła 4,151 kB/s.

Odchylenie standardowe w przypadku algorytmu bez SI wynosiło 0,655, co sugeruje mniejszą zmienność wyników w porównaniu do algorytmu z SI (w przypadku, którego odchylenie standardowe wyniosło 2,494). Minimalna przepustowość wynosiła odpowiednio 0,288 kB/s dla algorytmu bez SI oraz

0,347 kB/s dla algorytmu z SI, natomiast maksymalna przepustowość wyniosła odpowiednio 4,651 i 10,526 kB/s.



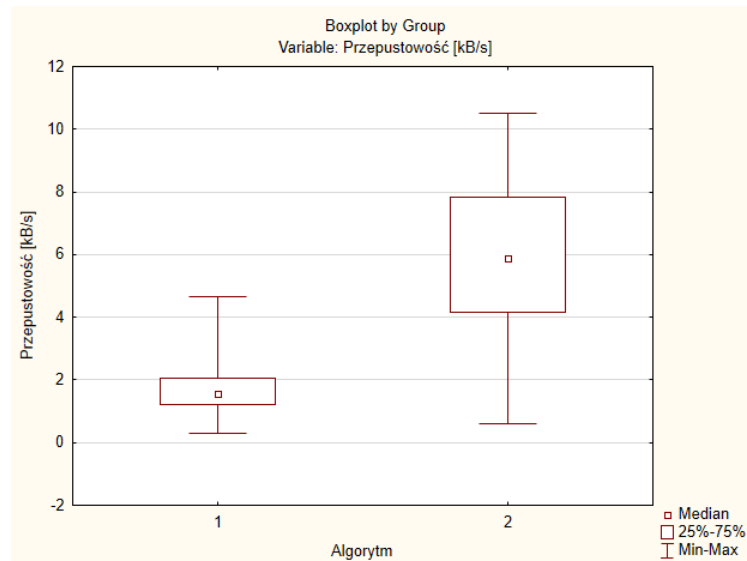
Rys. 72. Charakterystyka rozkładu danych czasu dotarcia pakietu w sieci zbudowanej z 10 węzłów (gdzie: 1- algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

Porównanie przepustowości dwóch algorytmów w sieci składającej się z 10 węzłów, gdzie: Z – standaryzowana wartość testu Manna-Whitney’a (statystyka testowa), p - prawdopodobieństwo otrzymania takiego (lub bardziej skrajnego) wyniku testu jak został zaobserwowany, przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa (prawdopodobieństwo testowe)

Tabela 15.

Parametr	Przepustowość - 10 węzłów	
	Algorytm bez SI	Algorytm z SI
Średnia	1,671	4,151
Odchylenie standardowe	0,655	2,494
Wartość min	0,288	0,347
Wartość max	4,651	10,526
Test U Manna-Whitneya: $Z = -22,541$; $p = 0,000$		
Istotne statystycznie		

Test U Manna-Whitneya potwierdził, że różnice w przepustowości w sieci składającej się z 10 węzłów między algorytmami są istotne statystycznie. Różnica w średnich wartościach przepustowości jest bardzo wyraźna, co wskazuje na przewagę algorytmu z SI pod względem szybkości przesyłania danych. Ponadto, algorytm z SI osiąga wyraźnie wyższą medianę przepustowości w porównaniu do algorytmu bez SI (rys. 73). Wskazany algorytm wykazuje większą zmienność w wynikach przepustowości, co może oznaczać zmienność wydajności w zależności od warunków sieciowych i obciążenia. Algorytm oparty na inteligencji roju wykazuje znacznie wyższe wartości maksymalnej przepustowości, co wskazuje na jego zdolność do uzyskiwania lepszych rezultatów w warunkach sprzyjających wydajności sieci.



Rys. 73. Charakterystyka rozkładu danych przepustowości w sieci zbudowanej z 10 węzłów (gdzie: 1- algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

W tabeli 16 przedstawiono analizę wskaźnika PDR w odniesieniu do dwóch algorytmów w sieci składającej się z 10 węzłów. Dla algorytmu bez SI, średnia wartość PDR wyniosła 94,522%, natomiast dla algorytmu z SI była nieznacznie niższa i wyniosła 94,001%. Odchylenie standardowe w obu przypadkach było zbliżone – 1,343 dla algorytmu bez SI i 1,254 dla algorytmu z SI, co sugeruje podobną stabilność w zakresie dostarczania pakietów. Minimalne wartości PDR wyniosły odpowiednio 91,98% (algorytm bez SI) oraz 86,49% (algorytm z SI), natomiast maksymalne wartości wyniosły odpowiednio 100% i 95,55%.

Porównanie PDR dwóch algorytmów w sieci składającej się z 10 węzłów, gdzie:
 Z – standaryzowana wartość testu Manna-Whitney'a (statystyka testowa),
 p - prawdopodobieństwo otrzymania takiego (lub bardziej skrajnego) wyniku testu jak został zaobserwowany, przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa (prawdopodobieństwo testowe)

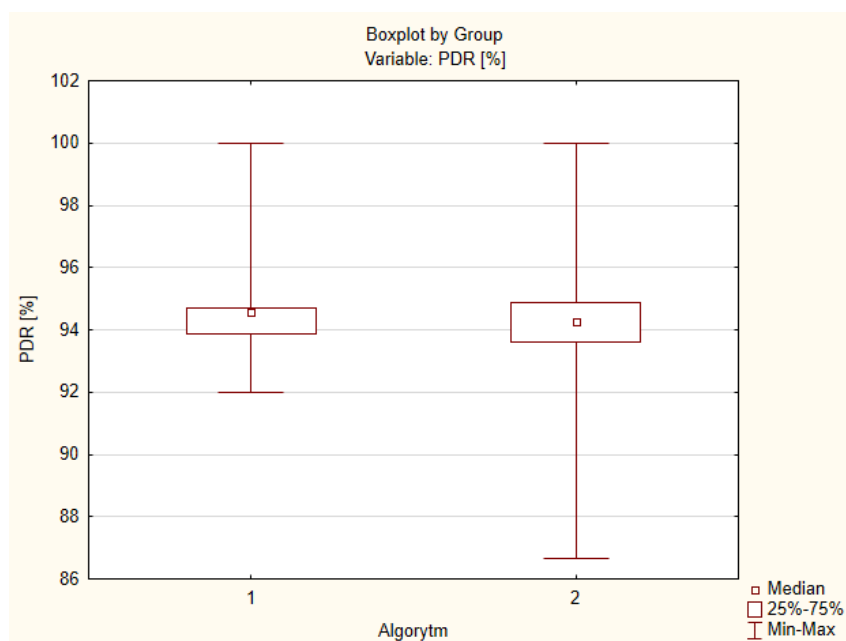
Tabela 16.

Parametr	PDR - 10 węzłów	
	Algorytm bez SI	Algorytm z SI
Średnia	94,522	94,001
Odchylenie standardowe	1,343	1,254
Wartość min	91,98	86,49
Wartość max	100	95,55
Test U Manna-Whitneya: $Z = 3,208$; $p = 0,001$		
Istotne statystycznie		

Test U Manna-Whitneya wykazał istotne różnice statystyczne w przypadku wskaźnika PDR w sieci składającej się z 10 węzłów. Chociaż średnie wartości są zbliżone, to jednak wykazują różnice wystarczająco istotne, aby potwierdzić pozytywny wpływ zastosowania SI na wyniki wskaźnika PDR. Wynika to z dużych próbek i wysokiej mocy testu.

Niskie odchylenie standardowe w przypadku obu algorytmów sugeruje, że wyniki wskaźnika PDR są stabilne i mało zmienne. Ponadto, oba algorytmy osiągają zbliżoną medianę wskaźnika PDR (około 95%), co sugeruje, że oba mają podobną średnią skuteczność w dostarczaniu pakietów (rys. 74).

Kolejny z wykonanych testów (Tabela 17) dotyczył porównania czasów dotarcia pakietu dla dwóch algorytmów w sieci składającej się z 15 węzłów. W przypadku algorytmu bez zastosowania inteligencji roju (SI) średni czas dotarcia pakietu wyniósł 322,600 ms, podczas gdy dla algorytmu z SI był on krótszy i wyniósł 114,990 ms. Odchylenie standardowe dla algorytmu bez SI wyniosło 130,975, co sugeruje większą zmienność czasów dotarcia pakietu w porównaniu do algorytmu z SI, gdzie odchylenie standardowe było mniejsze i wyniosło 64,659. Minimalny czas dotarcia pakietu wyniósł odpowiednio 75 ms (algorytm bez SI) i 1 ms (algorytm z SI), natomiast maksymalne wartości to odpowiednio 960 ms dla algorytmu bez SI i 252 ms dla algorytmu z SI.



Rys. 74. Charakterystyka rozkładu danych PDR w sieci zbudowanej z 10 węzłów (gdzie: 1 - algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

Porównanie czasów dotarcia pakietu dwóch algorytmów w sieci składającej się z 15 węzłów, gdzie: Z – standaryzowana wartość testu Manna-Whitney’a (statystyka testowa), p - prawdopodobieństwo otrzymania takiego (lub bardziej skrajnego) wyniku testu jak został zaobserwowany, przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa (prawdopodobieństwo testowe)

Tabela 17.

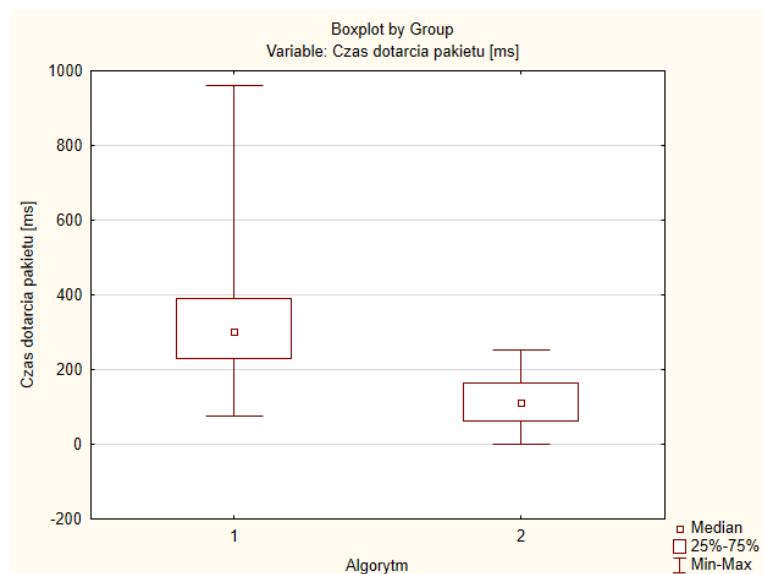
Parametr	Czas dotarcia pakietu - 15 węzłów	
	Algorytm bez SI	Algorytm z SI
Średnia	322,600	114,990
Odchylenie standardowe	130,975	64,659
Wartość min	75	1
Wartość max	960	252
Test U Manna-Whitneya: $Z = 52,094$; $p = 0,000$		
Istotne statystycznie		

Z rysunku 75 wynika, że algorytm z SI zauważalnie przewyższa algorytm bez SI pod względem efektywności, osiągając znacznie mniejszy czas dotarcia pakietu

oraz mniejszą zmienność wyników, co wskazuje na jego większą stabilność. Podczas gdy algorytm bez SI cechuje się szerokim zakresem czasów dotarcia pakietów, sięgającym nawet 1000 ms, algorytm z SI jest bardziej przewidywalny. Wynika z tego, że algorytm z SI jest bardziej spójny, efektywny i lepiej przystosowany do szybszego dostarczania pakietów w porównaniu do algorytmu bez SI, który wykazuje większe wahania i dłuższe czasy dostarczania pakietów. Oznacza to, że algorytm z zastosowaniem SI można scharakteryzować poprzez:

- większą efektywność pod względem szybkości dostarczania pakietów,
- większą spójność i stabilność działania - wskazuje na to mniejsze odchylenie standardowe,
- szybkość działania z jednoczesnym zapewnieniem bardziej przewidywalnych czasów dostarczenia pakietu,
- większą wydajność i niezawodność - znacznie niższe wartości minimalne i maksymalne czasu dotarcia pakietu.

Wynik testu U Manna-Whitneya pokazuje również, że różnice między czasami dotarcia pakietów w przypadku obu algorytmów są statystycznie istotne ($p < 0,05$). To oznacza, że obserwowane różnice w wynikach nie są przypadkowe i można z dużym prawdopodobieństwem stwierdzić, że algorytm z SI rzeczywiście przewyższa algorytm bez SI pod względem parametru czasu dotarcia pakietu.



Rys. 75. Charakterystyka rozkładu danych czasu dotarcia pakietu w sieci zbudowanej z 15 węzłów (gdzie: 1 - algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

W tabeli 18 przedstawiono porównanie przepustowości dwóch algorytmów w sieci składającej się z 15 węzłów. Średnia przepustowość dla algorytmu bez zastosowania inteligencji roju (SI) wyniosła 0,727 kB/s, podczas gdy dla algorytmu z SI była wyższa i wyniosła 3,129 kB/s.

Porównanie przepustowości dwóch algorytmów w sieci składającej się z 15 węzłów, gdzie: Z – standaryzowana wartość testu Manna-Whitney’a (statystyka testowa), p – prawdopodobieństwo otrzymania takiego (lub bardziej skrajnego) wyniku testu jak został zaobserwowany, przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa (prawdopodobieństwo testowe)

Tabela 18.

Parametr	Przepustowość - 15 węzłów	
	Algorytm bez SI	Algorytm z SI
Średnia	0,727	3,129
Odchylenie standardowe	0,308	5,499
Wartość min	0,208	0,004
Wartość max	2,667	50
Test U Manna-Whitneya: Z = -42,446; p = 0,000		
Istotne statystycznie		

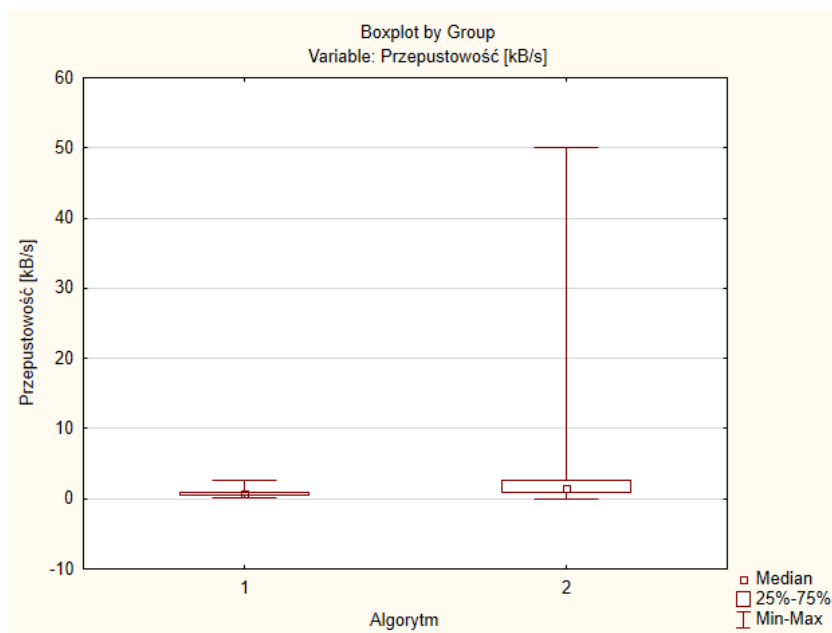
Odchylenie standardowe dla algorytmu bez SI wynosiło 0,308, co sugeruje stosunkowo niewielką zmienność wyników, natomiast dla algorytmu z SI odchylenie standardowe było już większe i wyniosło 5,499, co wskazuje na większą zmienność wyników w tej grupie. Minimalne wartości przepustowości wyniosły odpowiednio 0,208 kB/s dla algorytmu bez SI i 0,004 kB/s dla algorytmu z SI, natomiast maksymalne wartości wyniosły odpowiednio 2,667 i 50 kB/s.

Ponadto, z rysunku 76 wynika, że zakres 25%-75% (ang. Interquartile Range) jest bardzo niski, co sugeruje, że wyniki są stabilne i skoncentrowane w wąskim zakresie niskich wartości przepustowości. Dodatkowo wartości maksymalne i minimalne są zbliżone do wartości mediany, co wskazuje na brak istotnych odchyleń od średniej wydajności.

W przypadku algorytmu z wykorzystaniem SI można zaobserwować niewielki wzrost mediany w porównaniu do algorytmu bez SI. Zakres (25%-75%) jest jednak szeroki, a wartości maksymalne sięgają 50 kB/s, co wskazuje na zmienność wydajności algorytmu z SI, z możliwością uzyskania wysokich wyników w określonych warunkach działania sieci, takich jak odpowiednia

liczba węzłów sieciowych, niski poziom zakłóceń sygnału, wysoka jakość połączeń oraz odpowiednia konfiguracja parametrów transmisji danych.

Wynik testu U Manna-Whitneya pokazuje, że różnice między przepustowościami w przypadku obu algorytmów są statystycznie istotne ($p < 0,05$). To oznacza, że obserwowane różnice w wynikach nie są przypadkowe i można z dużym prawdopodobieństwem stwierdzić, że algorytm z SI rzeczywiście przewyższa algorytm bez SI pod względem przepustowości.



Rys. 76. Charakterystyka rozkładu danych przepustowości w sieci zbudowanej z 15 węzłów (gdzie: 1- algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

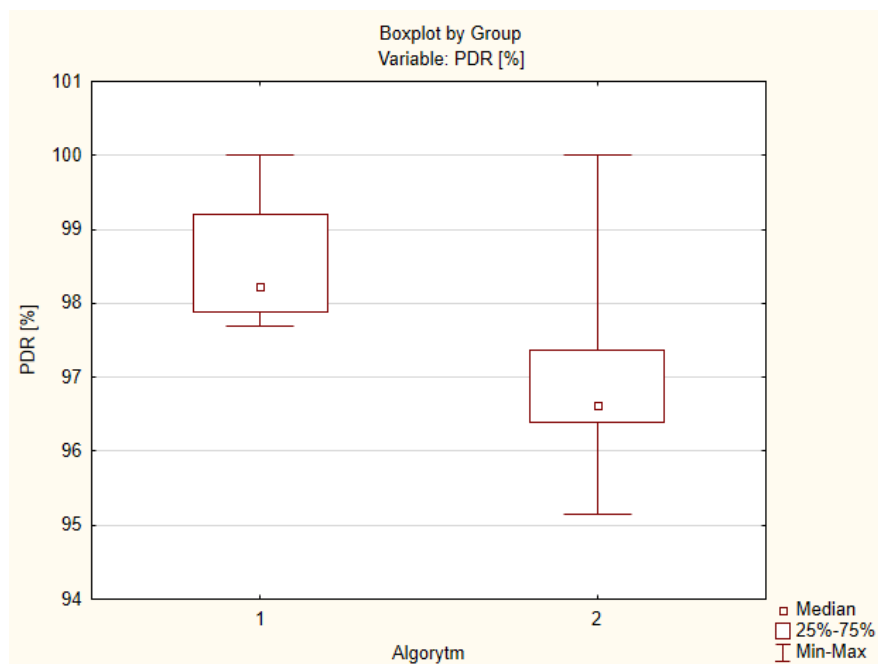
W tabeli 19 przedstawiono porównanie wskaźnika PDR w przypadku dwóch algorytmów w sieci składającej się z 15 węzłów. Dla algorytmu bez zastosowania inteligencji roju (SI) średnia wartość PDR wyniosła 98,661%, natomiast dla algorytmu z SI była nieco niższa i wyniosła 96,977%. Odchylenie standardowe było mniejsze w przypadku algorytmu bez SI (0,673), podczas gdy dla algorytmu z SI odchylenie standardowe wyniosło 1,031. Minimalne wartości PDR wyniosły odpowiednio 97,69% dla algorytmu bez SI oraz 95,15% dla algorytmu z SI, natomiast maksymalne wartości w obu przypadkach wyniosły 100%.

Porównanie PDR dwóch algorytmów w sieci składającej się z 15 węzłów, gdzie: Z – standaryzowana wartość testu Manna-Whitney’a (statystyka testowa), p – prawdopodobieństwo otrzymania takiego (lub bardziej skrajnego) wyniku testu jak został zaobserwowany, przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa (prawdopodobieństwo testowe)

Tabela 19.

Parametr	PDR - 15 węzłów	
	Algorytm bez SI	Algorytm z SI
Średnia	98,661	96,977
Odchylenie standardowe	0,673	1,031
Wartość min	97,69	95,15
Wartość max	100	100
Test U Manna-Whitneya: $Z = 42,750$; $p = 0,000$		
Istotne statystycznie		

W sieci składającej się z 15 węzłów (rys. 77) średnia wartość PDR w przypadku algorytmu bez SI jest nieco wyższa niż w przypadku algorytmu z SI. Również mediany tego współczynnika w odniesieniu do obydwu algorytmów różnią się nieznacznie. Oznacza to, że pierwszy z wymienionych algorytmów ma nieco lepszą skuteczność w dostarczaniu pakietów. Mniejsze odchylenie standardowe w przypadku algorytmu bez SI wskazuje ponadto na większą spójność działania. Obydwa algorytmy osiągają maksymalną wartość PDR równą 100% co oznacza, że w najlepszych przypadkach (stabilna praca sieci sensorycznej) oba mogą dostarczać wszystkie pakiety bez strat. Jednak algorytm bez SI ma wyższą minimalną wartość PDR, co sugeruje jego bardziej niezawodne działanie. Wynik testu U Manna-Whitneya pokazuje, że różnice między wskaźnikami dostarczenia pakietów w przypadku obu algorytmów są statystycznie istotne ($p < 0,05$). Oznacza to, że zaobserwowane różnice nie są przypadkowe, a algorytm bez SI rzeczywiście osiąga lepszy wynik PDR niż algorytm z SI. Mimo to, różnice między algorytmami są stosunkowo niewielkie, a obydwa algorytmy osiągają bardzo wysokie wartości PDR.



Rys. 77. Charakterystyka rozkładu danych PDR w sieci zbudowanej z 15 węzłów (gdzie: 1- algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

W tabeli 20 przedstawiono porównanie czasów dotarcia pakietu dla dwóch algorytmów w sieci składającej się z 20 węzłów. Średni czas dotarcia pakietu dla algorytmu bez zastosowania inteligencji roju (SI) wyniósł 79,055 ms, natomiast dla algorytmu z SI był nieznacznie krótszy i wyniósł 76,654 ms. Odchylenie standardowe dla algorytmu bez SI wyniosło 56,667, co wskazuje na większą zmienność wyników w porównaniu do algorytmu z SI, dla którego odchylenie standardowe wyniosło 42,751. Minimalny czas dotarcia pakietu był zbliżony dla obu algorytmów i wynosił odpowiednio 13 ms (algorytm bez SI) oraz 12 ms (algorytm z SI). Maksymalny czas dotarcia pakietu wyniósł 345 ms dla algorytmu bez SI i 247 ms dla algorytmu z SI.

Porównanie czasów dotarcia pakietu dwóch algorytmów w sieci składającej się z 20 węzłów, gdzie: Z – standaryzowana wartość testu Manna-Whitney'a (statystyka testowa), p – prawdopodobieństwo otrzymania takiego (lub bardziej skrajnego) wyniku testu jak został zaobserwowany, przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa (prawdopodobieństwo testowe)

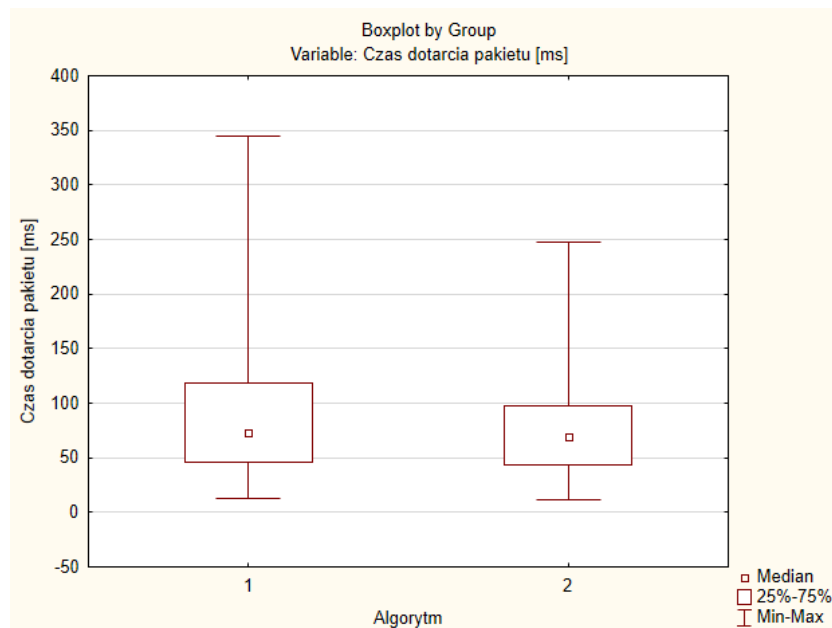
Tabela 20.

Parametr	Czas dotarcia pakietu - 20 węzłów	
	Algorytm bez SI	Algorytm z SI
Średnia	79,055	76,654
Odchylenie standardowe	56,667	42,751
Wartość min	13	12
Wartość max	345	247
Test U Manna-Whitneya: $Z = 4,018$; $p = 0,000$		
Istotne statystycznie		

Wyniki analizy pokazują (rys. 78), że algorytm z SI ma nieco lepszą wydajność pod względem czasu dotarcia pakietu w porównaniu do algorytmu bez SI w przypadku sieci składającej się z 20 węzłów. Średnia wartość czasu dotarcia pakietu jest nieco niższa w przypadku algorytmu z SI. Ponadto algorytm ten jest nie tylko szybszy, ale także bardziej stabilny (co potwierdzają niższe wartości odchylenia standardowego). Oba algorytmy mają również zbliżone wartości mediany czasów dostarczania pakietów.

Algorytm z SI wykazuje nieco mniejszą zmienność i bardziej ograniczony zakres czasów dostarczania pakietów, co może świadczyć o jego większej stabilności w porównaniu do algorytmu bez SI, który ma nieco większy rozrzut wyników. Algorytm z SI ma jednak niższą maksymalną wartość czasu dotarcia pakietu, co oznacza, że w warunkach skrajnych (wysokie obciążenie sieci, duża liczba retransmisji, zakłócenia sygnału, wysokie opóźnienia, niestabilne topologie sieci, ograniczone zasoby sprzętowe, awaria węzłów sieci) działa lepiej niż algorytm bez SI.

Obydwa algorytmy mają zbliżone wartości minimalne, co sugeruje, że w warunkach optymalnych (niskie obciążenie sieci, stabilna topologia sieci, brak zakłóceń sygnału, brak retransmisji, minimalne opóźnienia, dostępność zasobów sprzętowych) ich wydajność jest podobna. Test U Manna-Whitneya potwierdza, że różnice te są statystycznie istotne, co świadczy o tym, że algorytm z SI działa nieznacznie szybciej i bardziej stabilnie niż drugie z porównywanych rozwiązań.



Rys. 78. Charakterystyka rozkładu czasu dotarcia pakietu w sieci zbudowanej z 20 węzłów (gdzie: 1- algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

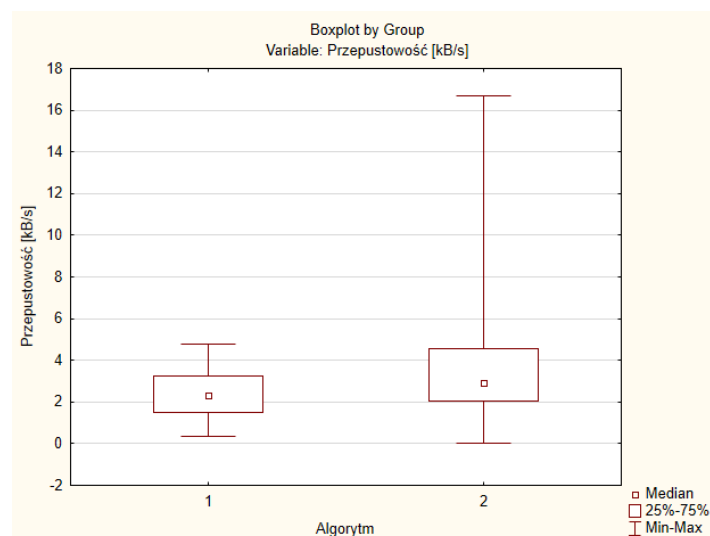
W tabeli 21 przedstawiono porównanie przepustowości dwóch algorytmów w sieci składającej się z 20 węzłów. Średnia przepustowość dla algorytmu bez zastosowania inteligencji roju (SI) wyniosła 3,771 kB/s, podczas gdy dla algorytmu z SI była nieznacznie niższa i wyniosła 3,688 kB/s. Odchylenie standardowe dla algorytmu bez SI wyniosło 1,089, a dla algorytmu z SI, gdzie odchylenie standardowe wyniosło 2,565. Minimalne wartości przepustowości wyniosły odpowiednio 0,371 kB/s dla algorytmu bez SI oraz 0,005 kB/s dla algorytmu z SI, natomiast maksymalne wartości wyniosły odpowiednio 4,762 i 16,667 kB/s.

Porównanie przepustowości dwóch algorytmów w sieci składającej się z 20 węzłów, gdzie: Z – standaryzowana wartość testu Manna-Whitney’a (statystyka testowa), p – prawdopodobieństwo otrzymania takiego (lub bardziej skrajnego) wyniku testu jak został zaobserwowany, przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa (prawdopodobieństwo testowe)

Tabela 21.

Parametr	Przepustowość - 20 węzłów	
	Algorytm bez SI	Algorytm z SI
Średnia	3,771	3,688
Odchylenie standardowe	1,089	2,565
Wartość min	0,371	0,005
Wartość max	4,762	16,667
Test U Manna-Whitneya: $Z = -13,414$; $p = 0,000$		
Istotne statystycznie		

Analiza wyników wykazała (rys. 79), że średnia wartość przepustowości jest nieznacznie wyższa w przypadku algorytmu bez SI. Natomiast algorytm z SI osiąga nieco wyższą medianę przepustowości niż algorytm bez SI. Większe odchylenie standardowe w przypadku algorytmu z SI wskazuje na większą zmienność przepustowości.



Rys. 79. Charakterystyka rozkładu przepustowości w sieci zbudowanej z 20 węzłów (gdzie: 1 - algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

Oznacza to, że wyniki w przypadku algorytmu z SI są mniej spójne i bardziej zróżnicowane. Algorytm z SI ma bowiem szerszy zakres wartości minimalnych i maksymalnych przepustowości. Osiąga znacznie wyższą wartość maksymalną (16,667; w porównaniu do algorytmu bez SI - 4,762), ale również bardzo niską wartość minimalną (0,005). To sugeruje, że choć algorytm z SI może osiągać wyższe przepustowości, może być również mniej przewidywalny w warunkach niestabilnej pracy sieci. Test U Manna-Whitneya potwierdza, że różnice między algorytmami są statystycznie istotne, co wskazuje na realną różnicę w przepustowości między tymi dwoma podejściami.

W tabeli 22 przedstawiono porównanie wskaźnika PDR dla dwóch algorytmów w sieci składającej się z 20 węzłów. Dla algorytmu bez zastosowania inteligencji roju (SI) średnia wartość PDR wyniosła 92,449%, natomiast dla algorytmu z SI była wyższa i wyniosła 99,002%.

Odchylenie standardowe było wyższe w przypadku algorytmu bez SI (1,360), podczas gdy dla algorytmu z SI odchylenie standardowe wyniosło 0,252. Minimalne wartości PDR wyniosły odpowiednio 83,33% dla algorytmu bez SI oraz 98,39% dla algorytmu z SI, natomiast maksymalne wartości w obu przypadkach wyniosły 100%.

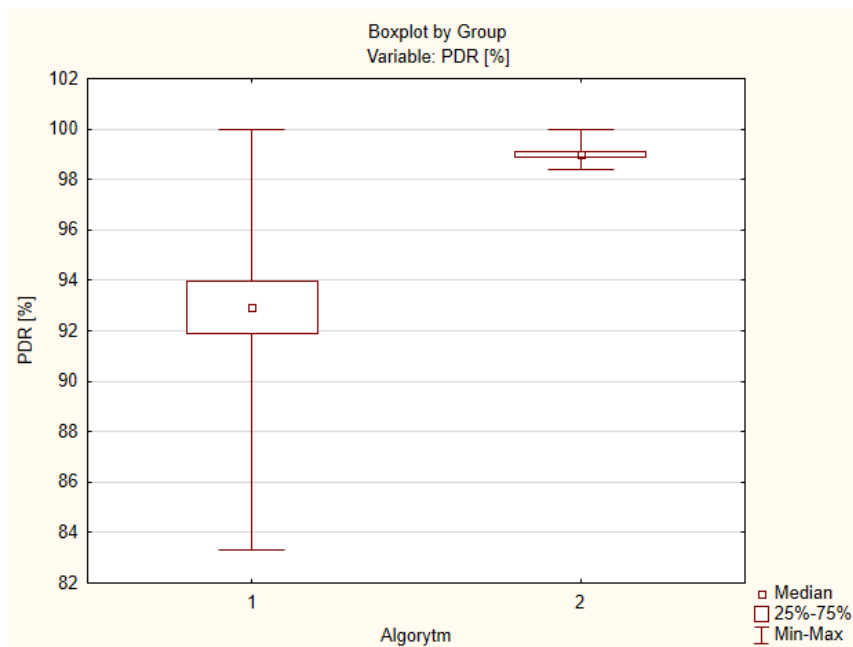
Porównanie PDR dwóch algorytmów w sieci składającej się z 20 węzłów, gdzie:
Z – standaryzowana wartość testu Manna-Whitney’a (statystyka testowa),
p - prawdopodobieństwo otrzymania takiego (lub bardziej skrajnego) wyniku testu jak został zaobserwowany, przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa (prawdopodobieństwo testowe)

Tabela 22.

Parametr	PDR – 20 węzłów	
	Algorytm bez SI	Algorytm z SI
Średnia	92,449	99,022
Odchylenie standardowe	1,360	0,252
Wartość min	83,33	98,39
Wartość max	100	100
Test U Manna-Whitneya: $Z = -48,930$; $p = 0,000$		
Istotne statystycznie		

Algorytm z zastosowaniem SI prezentuje (rys. 80) znacząco wyższy wskaźnik dostarczenia pakietów PDR w porównaniu do algorytmu bez SI w sieci

składającej się z 20 węzłów. Średnia wartość wskaźnika dostarczenia pakietów jest wyraźnie wyższa w przypadku algorytmu z SI. Algorytm z SI osiąga ponadto zauważalnie wyższą wartość mediany oraz znacznie mniejszą zmienność wyników. Mniejsze odchylenie standardowe w przypadku algorytmu z SI wskazuje na większą spójność i stabilność wyników dostarczenia pakietów w porównaniu do drugiego rozwiązania. Obydwa algorytmy osiągają maksymalną wartość PDR na poziomie 100%, ale algorytm z SI ma wyższą minimalną wartość PDR. Wyższa średnia wartość PDR oraz mniejsze odchylenie standardowe potwierdzają, że algorytm z SI nie tylko efektywniej dostarcza pakiety, ale także działa bardziej stabilnie i przewidywalnie. Test U Manna-Whitneya dodatkowo potwierdza istotność statystyczną tych różnic.



Rys. 80. Charakterystyka rozkładu danych PDR w sieci zbudowanej z 20 węzłów (gdzie: 1- algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

W tabeli 23 przedstawiono porównanie czasów dotarcia pakietu dla dwóch algorytmów w sieci składającej się z 25 węzłów.

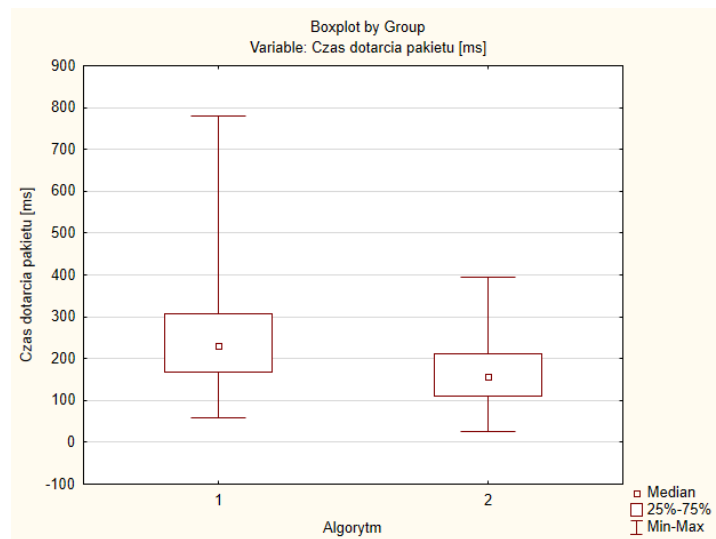
Porównanie czasów dotarcia pakietu dwóch algorytmów w sieci składającej się z 25 węzłów, gdzie: Z – standaryzowana wartość testu Manna-Whitney'a (statystyka testowa), p – prawdopodobieństwo otrzymania takiego (lub bardziej skrajnego) wyniku testu jak został zaobserwowany, przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa (prawdopodobieństwo testowe)

Tabela 23.

Parametr	Czas dotarcia pakietu – 25 węzłów	
	Algorytm bez SI	Algorytm z SI
Średnia	249,483	166,700
Odchylenie standardowe	107,726	73,557
Wartość min	59	25
Wartość max	779	395
Test U Manna-Whitneya: $Z = 23,697$; $p = 0,000$		
Istotne statystycznie		

Średni czas dotarcia pakietu dla algorytmu bez zastosowania inteligencji roju (SI) wyniósł 249,483 ms, natomiast dla algorytmu z SI był krótszy i wyniósł 166,700 ms. Odchylenie standardowe dla algorytmu bez SI wyniosło 107,726, a dla algorytmu z SI odchylenie standardowe wyniosło 73,557. Minimalny czas dotarcia pakietu wynosił odpowiednio 59 ms (algorytm bez SI) oraz 25 ms (algorytm z SI). Maksymalny czas dotarcia pakietu wyniósł 779 ms dla algorytmu bez SI i 395 ms dla algorytmu z SI.

Algorytm z użyciem inteligencji roju (SI) wykazuje (Rys. 81) znacząco mniejszy czas dotarcia pakietu w sieci składającej się z 25 węzłów w porównaniu do algorytmu bez SI. Algorytm z SI charakteryzują się także niższą wartością mediany i mniejszą zmiennością wyników niż algorytm bez SI. Algorytm bez SI, choć osiąga podobne minimalne czasy dostarczania pakietów, ma większy rozstęp wyników i dłuższy maksymalny czas dostarczenia (prawie 800 ms wobec 400 ms dla algorytmu z SI). Ponadto mniejsze odchylenie standardowe potwierdza, że algorytm z SI jest również bardziej stabilny w dostarczaniu pakietów. Test U Manna-Whitneya dodatkowo potwierdza istotność statystyczną tych różnic.



Rys. 81. Charakterystyka rozkładu czasu dotarcia pakietów w sieci zbudowanej z 25 węzłów

W tabeli 24 przedstawiono porównanie przepustowości dwóch algorytmów w sieci składającej się z 25 węzłów. Średnia przepustowość dla algorytmu bez zastosowania inteligencji roju (SI) wyniosła 0,953 kB/s, podczas gdy dla algorytmu z SI była wyższa i wyniosła 2,212 kB/s.

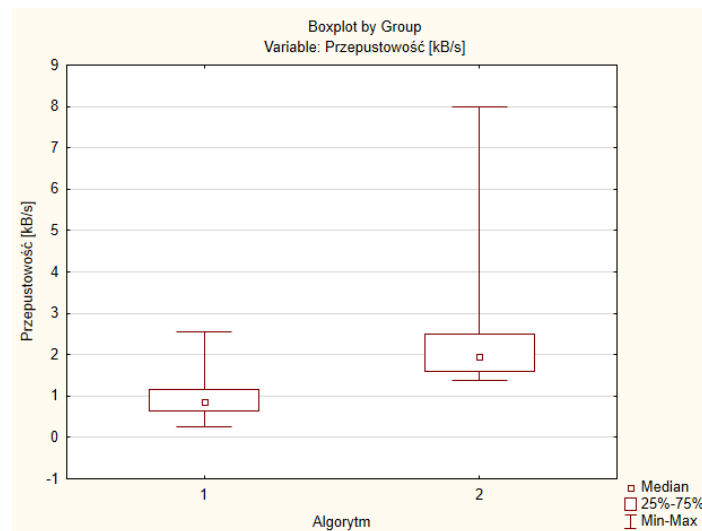
Porównanie przepustowości dwóch algorytmów w sieci składającej się z 25 węzłów, gdzie: Z – standaryzowana wartość testu Manna-Whitney’a (statystyka testowa), p - prawdopodobieństwo otrzymania takiego (lub bardziej skrajnego) wyniku testu jak został zaobserwowany, przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa (prawdopodobieństwo testowe)

Tabela 24.

Parametr	Przepustowość – 25 węzłów	
	Algorytm bez SI	Algorytm z SI
Średnia	0,953	2,212
Odchylenie standardowe	0,423	0,896
Wartość min	0,257	1,389
Wartość max	2,564	8
Test U Manna-Whitneya: Z = -40,674; p = 0,000		
Istotne statystycznie		

Odchylenie standardowe dla algorytmu bez SI wyniosło 0,423 a dla algorytmu z SI, gdzie odchylenie standardowe wyniosło 0,896. Minimalne wartości przepustowości wyniosły odpowiednio 0,257 kB/s dla algorytmu bez SI oraz 1,389 kB/s dla algorytmu z SI, natomiast maksymalne wartości wyniosły odpowiednio 2,564 i 8 kB/s.

W sieci składającej się z 25 węzłów algorytm z SI osiąga (rys. 82) znacznie wyższą średnią przepustowość. Ponadto, algorytm z SI osiąga wyższą wartość mediany oraz szerszy zakres wyników. Oznacza to, że sieć obsługiwana przez algorytm z SI jest w stanie przesyłać więcej danych w jednostce czasu niż sieć obsługiwana przez algorytm bez SI.



Rys. 82. Charakterystyka rozkładu danych przepustowości w sieci zbudowanej z 25 węzłów

Jednocześnie większe odchylenie standardowe wskazuje na większą zmienność w przepustowości w porównaniu do algorytmu bez SI. Tym samym, mimo że średnia przepustowość jest wyższa (w przypadku algorytmu z SI), jego wyniki są bardziej zróżnicowane (wyższa wartość minimalna, jak i maksymalna przepustowości). Oznacza to, że w optymalnych warunkach (niskie obciążenie sieci, stabilna topologia sieci, brak zakłóceń sygnału, brak retransmisji, minimalne opóźnienia, dostępność zasobów sprzętowych) jest w stanie obsłużyć znacznie więcej danych.

Wynik testu U Manna-Whitneya jednoznacznie wskazuje, że różnice między przepustowościami w przypadku obu algorytmów są statystycznie istotne ($p < 0,05$). Oznacza to, że algorytm z SI faktycznie różni się znacząco od algorytmu bez SI pod względem przepustowości.

W tabeli 25 przedstawiono porównanie wskaźnika PDR dla dwóch algorytmów w sieci składającej się z 25 węzłów. Dla algorytmu bez zastosowania inteligencji roju (SI) średnia wartość PDR wyniosła 96,604%, natomiast dla algorytmu z SI była nieco wyższa i wyniosła 97,669%.

Odchylenie standardowe było wyższe w przypadku algorytmu bez SI (0,987), podczas gdy dla algorytmu z SI odchylenie standardowe wyniosło 0,707. Minimalne wartości PDR wyniosły odpowiednio 94,93% dla algorytmu bez SI oraz 96,19% dla algorytmu z SI, natomiast maksymalne wartości w obu przypadkach wyniosły 100%.

Porównanie PDR dwóch algorytmów w sieci składającej się z 25 węzłów, gdzie:

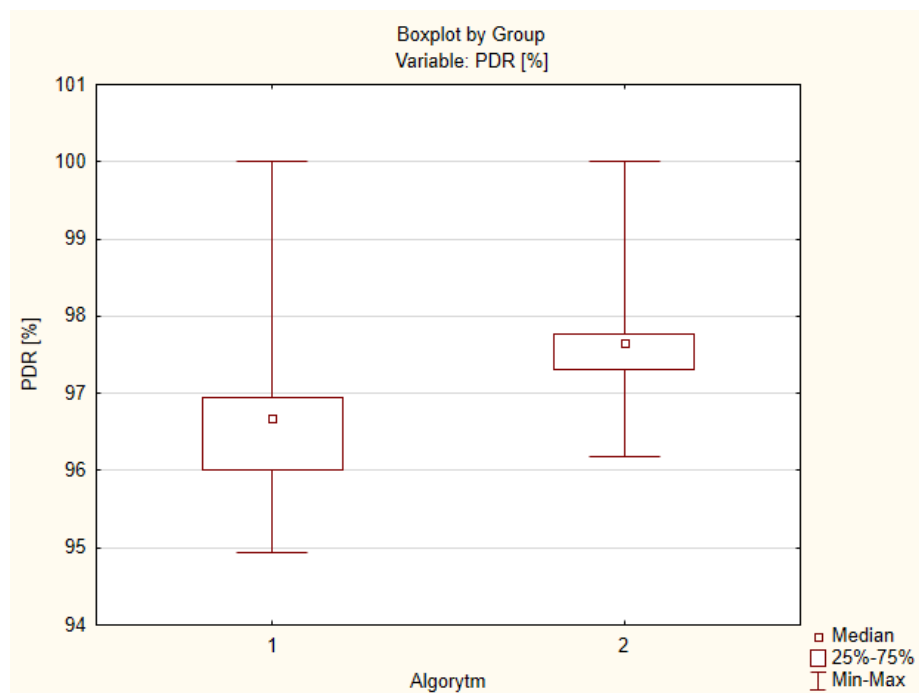
Z – standaryzowana wartość testu Manna-Whitney’a (statystyka testowa),

p – prawdopodobieństwo otrzymania takiego (lub bardziej skrajnego) wyniku testu jak został zaobserwowany, przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa (prawdopodobieństwo testowe)

Tabela 25.

Parametr	PDR – 25 węzłów	
	Algorytm bez SI	Algorytm z SI
Średnia	96,604	97,669
Odchylenie standardowe	0,987	0,707
Wartość min	94,93	96,19
Wartość max	100	100
Test U Manna-Whitneya: $Z = -38,865$; $p = 0,000$		
Istotne statystycznie		

Algorytm z użyciem inteligencji roju (SI) osiąga (rys. 83) wyższy średni wskaźnik dostarczenia pakietów (PDR) w sieci składającej się z 25 węzłów. Wartość mediany jest również nieco wyższa w przypadku algorytmu z SI. Oprócz wyższej średniej wartości PDR, charakteryzuje się także mniejszą zmiennością wyników, co świadczy o jego większej stabilności. Test U Manna-Whitneya potwierdza, że różnice między algorytmami są statystycznie istotne, co oznacza, że algorytm z SI jest skuteczniejszy w dostarczaniu pakietów.



Rys. 83. Charakterystyka rozkładu PDR w sieci zbudowanej z 25 węzłów (gdzie: 1- algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

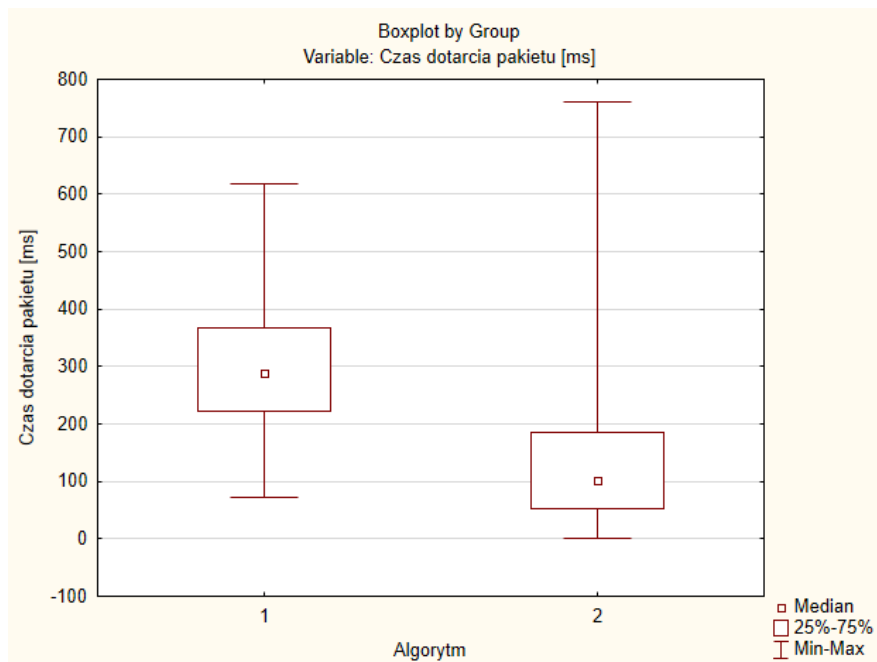
W tabeli 26 przedstawiono porównanie czasów dotarcia pakietu dla dwóch algorytmów w sieci składającej się z 30 węzłów. Średni czas dotarcia pakietu dla algorytmu bez zastosowania inteligencji roju (SI) wyniósł 301,894 ms, natomiast dla algorytmu z SI był blisko połowę krótszy i wyniósł 148,959 ms. Odchylenie standardowe dla algorytmu bez SI wyniosło 106,628, a dla algorytmu z SI odchylenie standardowe wyniosło 148,244. Minimalny czas dotarcia pakietu wynosił odpowiednio 72 ms (algorytm bez SI) oraz 1 ms (algorytm z SI). Maksymalny czas dotarcia pakietu wyniósł 618 ms dla algorytmu bez SI i 760 ms dla algorytmu z SI.

Porównanie czasów dotarcia pakietu dwóch algorytmów w sieci składającej się z 30 węzłów, gdzie: Z – standaryzowana wartość testu Manna-Whitney'a (statystyka testowa), p – prawdopodobieństwo otrzymania takiego (lub bardziej skrajnego) wyniku testu jak został zaobserwowany, przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa (prawdopodobieństwo testowe)

Tabela 26.

Parametr	Czas dotarcia pakietu – 30 węzłów	
	Algorytm bez SI	Algorytm z SI
Średnia	301,894	148,959
Odchylenie standardowe	106,628	148,244
Wartość min	72	1
Wartość max	618	760
Test U Manna-Whitneya: $Z = 61,891$; $p = 0,000$		
Istotne statystycznie		

Porównanie czasu dotarcia pakietu w sieci składającej się z 30 węzłów w przypadku dwóch algorytmów wykazało (Rys. 84), że pakiety są dostarczane znacznie szybciej w sieci zarządzanej przez algorytm z SI. Ponadto, algorytm z SI osiąga znacznie niższą wartość mediany. Jednak większe odchylenie standardowe w przypadku algorytmu z SI wskazuje na większą zmienność w czasie dotarcia pakietu. Oznacza to, że mimo niższego średniego czasu dotarcia pakietu, wyniki w przypadku algorytmu z SI mogą być bardziej zróżnicowane. Algorytm z SI także osiąga zarówno niższą wartość minimalną, jak i maksymalną czasu dotarcia pakietu. Oznacza to, że w optymalnych warunkach (niskie obciążenie sieci, stabilna topologia sieci, brak zakłóceń sygnału, brak retransmisji, minimalne opóźnienia, dostępność zasobów sprzętowych) jest w stanie dostarczyć pakiety szybciej niż algorytm bez SI, ale również mogą wystąpić pojedyncze przypadki z dłuższym czasem dostarczenia. Test U Manna-Whitneya potwierdza istotność statystyczną tych różnic, wskazując na realną przewagę algorytmu z SI w zakresie efektywności dostarczania pakietów.



Rys. 84. Charakterystyka rozkładu czasu dotarcia pakietu w sieci zbudowanej z 30 węzłów (gdzie; 1- algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

W tabeli 27 przedstawiono porównanie przepustowości dwóch algorytmów w sieci składającej się z 30 węzłów. Średnia przepustowość dla algorytmu bez zastosowania inteligencji roju (SI) wyniosła 0,748 kB/s, podczas gdy dla algorytmu z SI była wyższa i wyniosła 3,090 kB/s. Odchylenie standardowe dla algorytmu bez SI wyniosło 0,298, a dla algorytmu z SI odchylenie standardowe wyniosło 4,029. Minimalne wartości przepustowości wyniosły odpowiednio 0,199 kB/s dla algorytmu bez SI oraz 0,004 kB/s dla algorytmu z SI, natomiast maksymalne wartości wyniosły odpowiednio 2,778 i 33,333 kB/s.

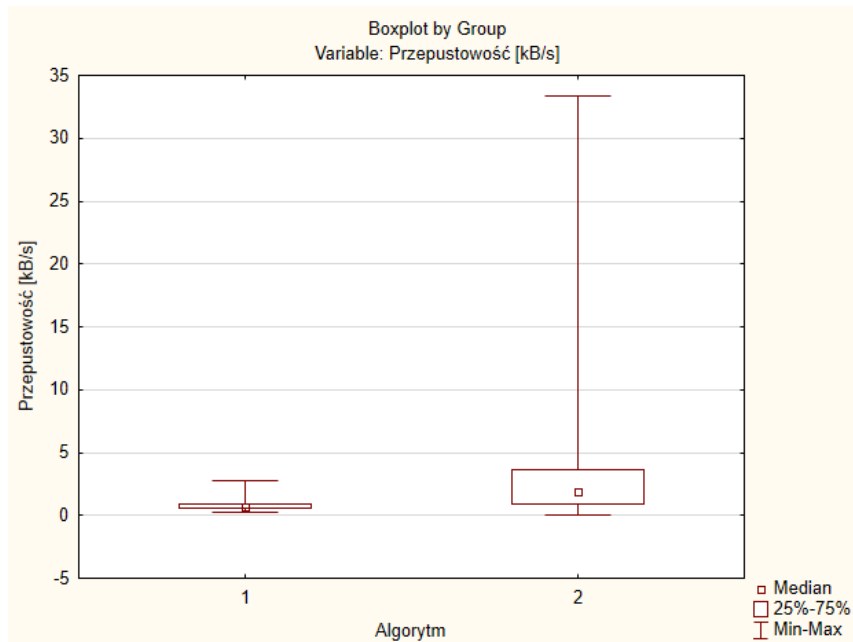
Porównanie przepustowości dwóch algorytmów w sieci składającej się z 30 węzłów, gdzie: Z – standaryzowana wartość testu Manna-Whitney’a (statystyka testowa), p – prawdopodobieństwo otrzymania takiego (lub bardziej skrajnego) wyniku testu jak został zaobserwowany, przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa (prawdopodobieństwo testowe)

Tabela 27.

Parametr	Przepustowość – 30 węzłów	
	Algorytm bez SI	Algorytm z SI
Średnia	0,748	3,090
Odchylenie standardowe	0,298	4,029
Wartość min	0,199	0,004
Wartość max	2,778	33,333
Test U Manna-Whitneya: $Z = -54,216$; $p = 0,000$		
Istotne statystycznie		

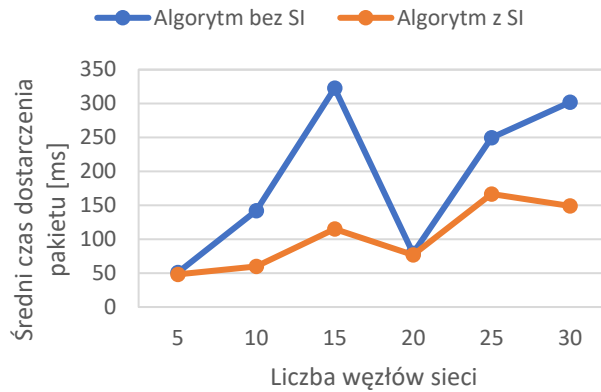
Średnia wartość przepustowości w sieci składającej się z 30 węzłów (rys. 85) jest znacząco wyższa w przypadku algorytmu z SI. Oznacza to, że algorytm z SI umożliwia przesyłanie danych z dużo większą wydajnością, co jest korzystne w przypadku efektywności całej sieci. Większe odchylenie standardowe w przypadku algorytmu z SI wskazuje na większą zmienność w przepustowości. Pomimo tego, że algorytm z SI oferuje wyższą średnią przepustowość jego wyniki są bardziej zróżnicowane i mogą wahać się znacznie w zależności od warunków (znacznie niższa wartość minimalna, jak i znacznie wyższa wartość maksymalna przepustowości). Algorytm z SI osiąga nieznacznie wyższą medianę niż algorytm bez SI, natomiast znacznie szerszy zakres wyników, co świadczy o jego zdolności do osiągnięcia większej efektywności w przesyłaniu danych. Algorytm bez SI, choć bardziej stabilny, ma ograniczone możliwości przepustowości. Algorytm z SI, mimo większej zmienności, oferuje znacznie większą elastyczność i może obsługiwać wyższe przepływy danych. To oznacza, że w pewnych warunkach (niskie obciążenie sieci, stabilna topologia sieci, brak zakłóceń sygnału, brak retransmisji, minimalne opóźnienia, dostępność zasobów sprzętowych) algorytm z SI może osiągać ekstremalnie wysokie wartości przepustowości, ale również może mieć bardzo niskie wartości w mniej korzystnych sytuacjach (wysokie obciążenie sieci, duża liczba retransmisji, zakłócenia sygnału, wysokie opóźnienia, niestabilne topologie sieci, ograniczone zasoby sprzętowe, awaria węzłów sieci). Test U Manna-Whitneya

potwierdza, że różnice te są statystycznie istotne, co oznacza, że algorytm z SI znacząco wzmacnia wydajność sieci w zakresie przepustowości.



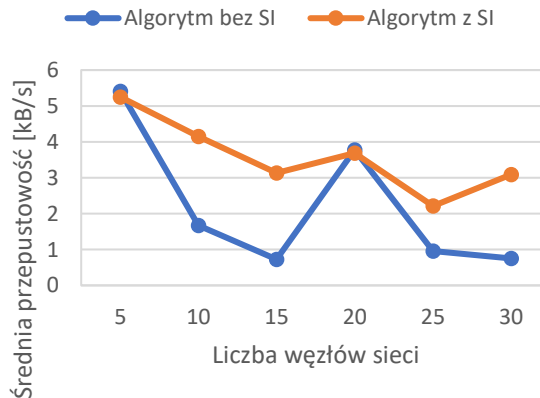
Rys. 85. Charakterystyka rozkładu przepustowości w sieci zbudowanej z 30 węzłów

W końcowym etapie analizy zestawiono uśrednione wartości czasu dostarczenia pakietu do miejsca docelowego, przepustowości oraz współczynnika PDR, porównując badane algorytmy pod kątem ich reakcji na zmianę liczby węzłów w sieci. Na rysunku 86 przedstawiono zależność średniego czasu dostarczenia pakietu danych od liczby węzłów dla obu wariantów – algorytmu z wykorzystaniem inteligencji roju (SI) oraz rozwiązania bazowego, pozbawionego mechanizmów SI. Wykres pozwala prześledzić, w jaki sposób rozbudowa sieci wpływa na opóźnienia end-to-end oraz jak różnią się charakterystyki obu algorytmów w warunkach rosnącej złożoności topologii.



Rys. 86. Średni czas dostarczenia pakietu danych dwóch algorytmów w zależności od liczby węzłów sieci

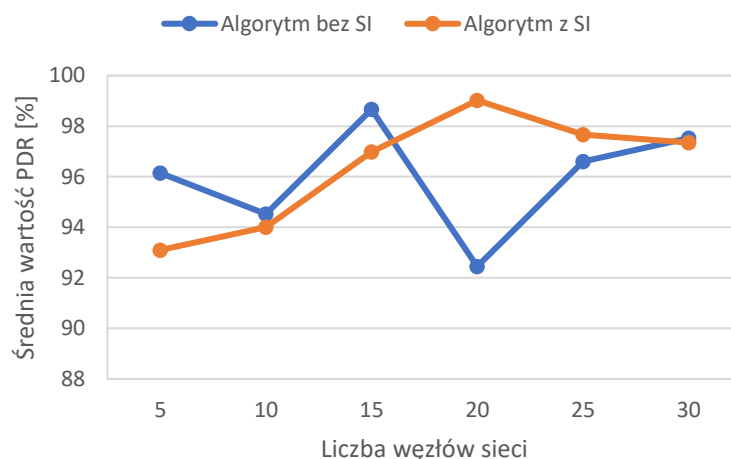
W porównaniu z wariantem pozbawionym mechanizmów SI, opracowany algorytm ogranicza narastanie czasu dotarcia pakietu do miejsca docelowego w sieciach liczących 25 i więcej węzłów, a jednocześnie stabilizuje tę wartość na poziomie około 150 ms. Na rysunku 87 przedstawiono średnią przepustowość uzyskaną dla obu algorytmów w funkcji liczby węzłów – z zaprezentowanych przebiegów wynika, że rozwiązanie z zastosowaniem inteligencji roju osiąga globalnie korzystniejsze parametry przepustowości niż algorytm referencyjny bez SI.



Rys. 87. Średnia wartość przepustowości dwóch algorytmów w zależności od liczby węzłów sieci

Opracowany algorytm przyczynia się także do zwiększenia przepustowości sieci w porównaniu z wariantem pozbawionym mechanizmów SI. Dla konfiguracji obejmującej 30 węzłów średnia przepustowość osiąga wartość około 3 kB/s. Co istotne, parametry te są wyraźnie bardziej stabilne – zmiany przepustowości pomiędzy kolejnymi konfiguracjami sieci są mniejsze, a wraz ze wzrostem liczby węzłów nie pojawiają się tak głębokie spadki, jak w przypadku algorytmu referencyjnego bez SI.

Na rysunku 88 przedstawiono średnie wartości współczynnika PDR dla obu algorytmów (bez SI oraz z SI) w zależności od liczby węzłów sieci. Dla każdej z analizowanych konfiguracji współczynnik PDR utrzymuje się na poziomie powyżej 90%, jednak algorytm z zastosowaniem inteligencji roju charakteryzuje się wyższą średnią oraz większą stabilnością – we wszystkich przypadkach uzyskuje wartości przekraczające 94%, co przekłada się na większą pewność dostarczenia danych do miejsca docelowego. W przypadku algorytmu bez SI widoczne są wyraźne wahania PDR (m.in. przy 10 i 20 węzłach), co wskazuje na mniejszą niezawodność transmisji w zastosowaniach wymagających wysokiego poziomu pewności komunikacji.



Rys. 88. Średnia wartość wskaźnika PDR dwóch algorytmów w zależności od liczby węzłów sieci

Podsumowując wyniki badań, przeprowadzono ocenę efektywności algorytmu trasowania w bezprzewodowej sieci sensorycznej dla różnych liczebności węzłów: 5, 10, 15, 20, 25 oraz 30. Analiza porównawcza wykazała,

że zastosowanie algorytmu wykorzystującego mechanizmy inteligencji roju (SI) prowadzi do wyraźnej poprawy kluczowych parametrów pracy sieci w stosunku do algorytmu referencyjnego, tj. bez SI. Dotyczy to zarówno czasu dotarcia pakietów do miejsca docelowego, jak i przepustowości oraz współczynnika dostarczenia pakietów (PDR).

Algorytm z SI pozwala na stabilizację średniego czasu dotarcia pakietu na poziomie około 150 ms przy liczbie węzłów wynoszącej 25 i więcej, a w konfiguracji 30-węzłowej umożliwia osiągnięcie przepustowości rzędu 3 kB/s. Jednocześnie dla wszystkich analizowanych wariantów liczebności sieci utrzymuje wartość współczynnika PDR powyżej 94%, co przekłada się na wysoką pewność dostarczania danych. Zastosowanie testu U Manna-Whitneya potwierdziło statystycznie istotne różnice pomiędzy algorytmem z SI a algorytmem bez SI, co jednoznacznie wskazuje na przewagę rozwiązania opartego na inteligencji roju w kontekście zarządzania trasowaniem w projektowanej sieci sensorycznej.

7. Ocena możliwości wdrożenia węzłów sieci sensorycznej w wykonaniu ATEX

Jako podstawowy obszar implementacji sieci sensorycznej założono środowisko zagrożone wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego. Projektowane węzły sieci sensorycznej muszą spełniać wymagania określone w dyrektywie ATEX [79]. Wprowadzenie tego założenia stawia dodatkowe wymagania w zakresie doboru urządzeń sieciowych, ich obudów oraz konieczności zwiększenia niezawodności działania projektowanego systemu.

Dyrektywa ATEX [77, 78, 81] określa zasady stosowania produktów w przestrzeniach zagrożonych wybuchem i obowiązuje we wszystkich państwach członkowskich Unii Europejskiej. Została opracowana przez Dyрекcję Generalną ds. Przedsiębiorstw i Przemysłu Komisji Europejskiej we współpracy z państwami członkowskimi, przemysłem europejskim, organizacjami CEN i CENELEC oraz instytucjami notyfikowanymi, takimi jak BAM, PTB oraz TÜV.

W rezultacie wyodrębniono zestaw norm zharmonizowanych, których wymagania muszą spełniać projektowane urządzenia. Do najważniejszych z nich należą:

- PN-EN IEC 60079-0:2018-09 [84] - Atmosfery wybuchowe - Część 0: Urządzenia - Podstawowe wymagania,
- PN-EN IEC 60079-11:2025-12 [85] - Atmosfery wybuchowe - Część 11: Zabezpieczenie urządzeń za pomocą iskrobezpieczeństwa "i".

7.1 Analiza spełnienia wymagań dyrektywy ATEX przez obudowę węzłów sieci

W ramach niniejszego rozdziału dokonano przeglądu regulacji prawnych oraz norm dotyczących wymagań w zakresie pracy urządzeń i maszyn stosowanych w podziemnych zakładach górniczych.

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 roku (Dz.U.2017 poz.118) [80], dotyczącym szczegółowych wymagań w zakresie prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych, w zakładzie górnicy muszą być stosowane maszyny, urządzenia, materiały, środki i substancje chemiczne, wyroby z tworzyw sztucznych oraz środki i sprzęt

strzałowy odpowiednio dobrane do warunków geologiczno-górnich i środowiskowych miejsca ich zastosowania.

Do podstawowych kryteriów według których oceniane są materiały stosowane do konstrukcji urządzeń należą:

- **niepalność** - materiały i wyroby stosowane w wyrobiskach górniczych muszą spełniać wymagania dotyczące trudnopalności. Wymagania te są weryfikowane zgodnie z punktem 6.2 normy PN-EN ISO/IEC 80079-38:2017-02 [86] oraz testem płomieniowym zgodnym z PN-EN ISO 340:2022-12 [82]. Podczas testu czas przyłożenia płomienia wynosi 10 sekund, a czas palenia po jego usunięciu nie może przekraczać 15 sekund,
- **antyelektrostatyczność** - zgodnie z normą PN-EN IEC 60079-0:2018-09 [84], punkt 7.4.2, urządzenia elektryczne powinny być zaprojektowane w sposób minimalizujący ryzyko zapłonu spowodowanego ładunkami elektrostatycznymi. Osiąga się to poprzez odpowiedni dobór materiałów, ograniczenie powierzchni niemetalowych lub zastosowanie przewodzącej powłoki,
- **nietoksyczność** - oceniana na podstawie substancji wydzielanych podczas spalania. Śląski Uniwersytet Medyczny przeprowadza analizy toksyczności i generuje raporty, które stanowią podstawę do oceny spełnienia tego wymogu,
- **wytrzymałość mechaniczna** - badania dotyczące odporności na uderzenia mechaniczne i termiczne, spadek swobodny oraz stopień ochrony zapewnianej przez obudowy są przeprowadzane zgodnie z normami PN-EN IEC 60079-0:2018-09 [84] i PN-EN 60529:2003 [83]. Obejmują one różne scenariusze temperaturowe oraz specyficzne warunki środowiskowe, które mogą wystąpić podczas eksploatacji.

Po konsultacjach z przedstawicielami Jednostki Certyfikującej (ITG KOMAG) sprecyzowano wymagania dotyczące materiałów stosowanych do wykonania obudów urządzeń elektrycznych o charakterystyce przeciwwybuchowej. Rozpatrywane są dwa przypadki:

1. **Certyfikacja urządzenia z obudową wykonaną z danego materiału** - w tym przypadku analizowane jest całe urządzenie. Praktyka badawcza wskazuje, że takie urządzenia nie zawsze są badane pod kątem toksyczności, a w niektórych przypadkach także nie są testowane pod kątem trudnopalności. Natomiast antyelektrostatyczność musi być obowiązkowo badana.

2. **Certyfikacja samego materiału** - w tym przypadku materiał podlega testom na trudnopalność, toksyczność oraz antyelektrostatyczność.

Projektowany węzeł sieci jest urządzeniem pracującym w strefie I, a certyfikacji podlega urządzenie umieszczone w obudowie wykonane z materiału niemetalowego. Węzeł musi również spełniać wymagania stawiane urządzeniem iskrobezpiecznym, podlega więc wytycznym norm PN-EN IEC 60079-11:2025-12 [85] oraz PN-EN IEC 60079-0:2018-09 [84].

Norma PN-EN IEC 60079-11:2025-12 [85] wyklucza pewne badania wymagane przez normę PN-EN IEC 60079-0:2018-09 [840]. Zgodnie z zapisami normy PN-EN IEC 60079-11:2025-12 [85], obudowa projektowanego urządzenia musi przejść badania antyelektrostatyczności oraz szczelności obudowy przed wnikaniem pyłu i wody:

- cytując fragment punktu 7.4.2 - „... odpowiedni dobór materiału tak, aby wartość rezystancji powierzchniowej nie była wyższa od którejkolwiek z podanych poniżej, mierzona zgodnie z 26.13; $10^9 \Omega$ mierzona w wilgotności względnej $(50 \pm 5) \%$, lub $10^{11} \Omega$ mierzona w wilgotności względnej $(30 \pm 5) \%$...”,
- badania urządzenia potwierdzające jego szczelność na poziomie co najmniej IP54.

Konieczne jest również określenie technologii wykonania obudowy, uwzględniając wymagania dyrektywy ATEX oraz aspekty ekonomiczne. Obudowa pojedynczego węzła sieci może być wykonana przy zastosowaniu jednej z czterech różnych technologii:

- **obróbka CNC (ang. Computerized Numerical Control) certyfikowanego materiału** - zastosowanie certyfikowanego materiału spełniającego wymagania antyelektrostatyczności, który będzie zakupiony i dostarczany do zakładu wytwórczego. Technologia ta ogranicza możliwość realizacji skomplikowanych konstrukcyjnie elementów, co może wymagać uproszczenia pierwotnego projektu lub całkowitej zmiany konstrukcji. Mimo wskazanych ograniczeń, obróbka CNC pozwala na produkcję jednostkową, co stanowi jej istotną zaletę. Cena materiału spełniającego warunki antyelektrostatyczności stanowi koszt około 200 PLN za kilogram płyty PP-EL-s elektroprowadzącej firmy SIMONA,
- **wytwarzanie za pomocą druku 3D** - oferuje znaczącą elastyczność w projektowaniu skomplikowanych geometrii, które są trudno

wykonalne lub nieopłacalne do wykonania przy użyciu konwencjonalnych metod obróbki ubytkowej. Na rynku dostępne są filamenty, których producenci deklarują spełnienie wymagań odpowiedniej wartości rezystancji powierzchniowej wykonanych z niej obudów. Technologia jest również szczególnie cenna ze względu na możliwość personalizacji i łatwego prototypowania. Cena filamentu do wykonania obudów spełniającego wymagania to koszt około 700 PLN za 800 gramów filamentu Zortrax ESD,

- **zastosowanie form silikonowych** - efektywna kosztowo metoda (koszt formy silikonowej wynosi kilka tysięcy złotych) pozwalająca na szybką produkcję elementów (do 50 sztuk z jednej formy). Elementy wytworzone tą metodą charakteryzują się niższymi parametrami fizycznymi i mechanicznymi z powodu braku odpowiedniego ciśnienia formującego obudowę. Metoda ogranicza również złożoność konstrukcyjną obudów, co jest istotną wadą,
- **produkcja przy użyciu form wtryskowych** - charakteryzuje się wysoką jakością uzyskanego detalu, zarówno pod względem mechanicznym i chemicznym. Jest to preferowana metoda produkcji masowej ze względu na jej opłacalność przy wysokich wolumenach produkcyjnych. Obudowy wytwarzane tą techniką zapewniają wysoką powtarzalność oraz możliwość realizacji skomplikowanej geometrii z zachowaniem precyzyjnych wartości tolerancji. Opłacalność zaczyna się dopiero przy wykonaniu minimum tysiąca sztuk danej obudowy. Ceny form wtryskowej rozpoczynają się od kilkudziesięciu tysięcy złotych.

Biorąc pod uwagę opisane czynniki zdecydowano się na wykonanie prototypów obudów w technologiach druku 3D oraz z zastosowaniem formy silikonowej. W obydwu przypadkach konieczny jest pomiar rezystancji powierzchniowej po wykonaniu obudowy.

Na rysunku 89 przedstawiono widok obudów węzła typu NODE wykonanych w wybranych technologiach wykonania. Projekt obudowy stanowi autorskie rozwiązanie, jednak w pracy pominięto opis procesu modelowania oraz optymalizacji postaci konstrukcyjnej.



Rys. 89. Widok obudów węzła typu NODE wykonanych różnymi technologiami, gdzie:

PR1 - wydruk 3D z filamentu Zortrax ESD spełniającego wymogi rezystancji powierzchniowej [94], PR2 - obudowa wykonana z form silikonowych wykonana na podstawie dostarczonego wydruku 3D, PR3 - wydruk 3D z filamentu ABS, PR4 - wykonanie w technologii druku 3D przez firmę zewnętrzną deklarującą spełnienie wymagań odpowiedniej wartości rezystancji powierzchniowej

Na obudowach naklejone zostały paski z folii przewodzącej w celu przeprowadzenia pomiaru rezystancji powierzchniowej. Pomiary wykonane zostały przyrządem BM878 firmy Brymen [93].

Wyniki pomiarów rezystancji powierzchniowej badanych próbek obudowy węzła typu NODE

Tabela 28.

Lp.	Badana próbka	Wartość rezystancji powierzchniowej (mierzona przy wartości napięcia 500V)	Wartość rezystancji powierzchniowej (mierzona przy wartości napięcia 1000V)
1	PR1	0,145 MΩ	0,144 MΩ
2	PR2	> 550 MΩ	> 25 GΩ
3	PR3	> 550 MΩ	> 25 GΩ
4	PR4	0,012 MΩ	0,008 MΩ

Obudowy wykonane w technologii druku 3D z zastosowaniem filamentu spełniającego wymagania odpowiedniej wartości rezystancji powierzchniowej PR1 oraz PR4 przeszły pomyślnie weryfikację zgodności z wymaganiami normy.

Filament wykonany z ABS, jak również obudowa wykonana z formy silikonowej nie spełniają normatywnych wymagań. Spełnienie wymagań w zakresie rezystancji powierzchniowej można zrealizować poprzez pokrycie wykonanej obudowy trudnościeralną farbą spełniającą wymagane parametry rezystancji powierzchniowej [95]. Jest to jednak dodatkowy zabieg, który należy uwzględnić w procesie technologicznym. Dodatkowo w procesie eksploatacji istnieje ryzyko łuszczenia lub uszkodzenia powłoki, co niekorzystnie wpływa na obniżenie wymaganego poziomu spełnienia wymagań bezpieczeństwa eksploatacyjnego.

Obudowy poddano również badaniom w zakresie wytrzymałości na ściskanie (rys. 90).



Rys. 90. Stanowisko do badań na ściskanie obudów węzłów sieci sensorycznej

Badane obudowy węzła wykazywały wytrzymałość na ściskanie do wartości sił przedstawionych w tabeli 29. Największą wytrzymałością na ściskanie charakteryzuje się obudowa PR2, nie spełnia ona jednak wymagań w zakresie koniecznej do uzyskania wartości rezystancji powierzchniowej. Obudowy PR1 oraz PR3 wykazują najmniejszą wytrzymałość na ściskanie. Obudowa PR4 przy spełnieniu wymogu rezystancji powierzchniowej, wykazuje dwukrotnie lepsze parametry wytrzymałościowe niż obudowy PR1 oraz PR3.

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie obudów węzłów sieci sensorycznej

Tabela 29.

Lp.	Badana próbka	Siła maksymalna [kN]	Odkształcenie [mm]
1	PR1	7,1	2,97
2	PR2	53,8	8,65
3	PR3	6	1,82
4	PR4	12	3,1

Wytrzymałość na ściskanie obudowy PR4 jest prawie 5-krotnie gorsza niż obudowy PR2. Technologia wykonania obudowy w druku 3D charakteryzuje się niższymi parametrami wytrzymałościowymi porównaniu z technologią odlewu z form silikonowych. Wybór procesu technologicznego wykonania obudowy zależy od wielkości serii produkcyjnej oraz spełnienia wymogów dyrektywy ATEX. W omawianym przypadku zakłada się wykonanie pojedynczych prototypów oraz serii w liczbie 100 sztuk rocznie. Przy założonej skali produkcji zastosowanie technologii form wtryskowych jest całkowicie nieopłacalne. W przypadku technologii druku 3D oraz obróbki CNC, na rynku dostępne są materiały spełniające wymogi antyelektrostatyczności. Producenci deklarują spełnienie wymagań odnośnie do rezystancji powierzchniowej, jednak bez przedstawienia certyfikatu zgodności z normami zharmonizowanymi z dyrektywą ATEX, co wymaga potwierdzenia spełnienia wymagań za pomocą testów wykonanych po wytworzeniu obudowy. Technologia odlewów z form silikonowych wymaga nałożenia dodatkowej powłoki antyelektrostatycznej, co obniża odporność na eksploatację oraz zwiększa koszty. Wykonanie obudów prototypowych jest najbardziej opłacalne w technologii druku 3D, ze względu na elastyczność i swobodę projektowania. Natomiast wykonanie obudów w małych seriach (do 100 sztuk) jest najbardziej ekonomiczne przy użyciu form silikonowych.

7.2. Analiza spełnienia wymagań dyrektywy ATEX przez obwody elektryczne węzłów projektowanej sieci sensorycznej

Do celów implementacji rozwiązania w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych wyrobisk górniczych wykonano obliczenia elementów zabezpieczających wprowadzonych do obwodów elektrycznych węzłów sieci (typów NODE oraz SINK), w celu potwierdzenia ich zgodności z wymaganiami dyrektywy ATEX [77, 78, 81] oraz spełnienia wymagań norm zharmonizowanych z dyrektywą.

Zgodnie z wytycznymi zawartymi w normach poszczególne węzły powinny charakteryzować się następującymi cechami charakteryzującymi obudowy przeciwwybuchowe:

- I (M1) [Ex ia] I Ma - w przypadku węzła typu NODE,
- I (M2) [Ex ib] I Mb - w przypadku węzła typu SINK.

Przy czym oznaczenia wskazują na przeznaczenie, wymagany poziom zabezpieczeń oraz charakterystykę stosowanych urządzeń:

- I - grupa urządzeń pracujących w podziemiach kopalń węgla kamiennego,
- M1 (Ma) - bardzo wysoki poziom bezpieczeństwa, mało prawdopodobne źródło zapłonu, nawet w przypadku rzadko występujących uszkodzeń,
- M2 (Mb) - wysoki poziom bezpieczeństwa, mało prawdopodobne źródło zapłonu podczas spodziewanych uszkodzeń, urządzenie wyłączane w przypadku wystąpienia atmosfery wybuchowej,
- Ex ia - rodzaj ochrony przeciwwybuchowej, w przypadku której obwody elektryczne stanowiące tzw. obwody iskrobezpieczne muszą zostać powielone trzykrotnie. W przypadku uszkodzenia elementu zabezpieczającego pozostają jeszcze dwa zabezpieczenia elektryczne,
- Ex ib - oznacza rodzaj ochrony przeciwwybuchowej, w przypadku której obwody elektryczne stanowiące tzw. obwody iskrobezpieczne muszą zostać powielone dwukrotnie. W przypadku uszkodzenia elementu zabezpieczającego pozostaje jeszcze jedno zabezpieczenie elektryczne.

Materiały zastosowane w konstrukcji węzłów typu NODE oraz SINK powinny być ściśle określone przez wartości parametrów (tabela 30).

**Zestawienie maksymalnych wartości parametrów wejściowych elementów
projektowanej sieci sensorycznej**

Tabela 30.

Parametr	Wartość parametru	
	Węzeł typu SINK	Węzeł typu NODE
Maksymalne napięcie wejściowe U_i [V]	6	4
Maksymalny natężenie prądu wejściowego I_i [A]	1	1
Indukcyjność wewnętrzna L_i [H]	0	0
Pojemność wewnętrzna C_i [μF]	0	0

Każde następne urządzenia wykonane w dowolnym procesie technologicznym powinno być zgodne z wymaganiami podanymi w dokumentacji konstrukcyjnej. Elementy bierne oraz elementy półprzewodnikowe odpowiedzialne za bezpieczeństwo obwodów iskrobezpiecznych wymienione są w tabelach 31 i 32.

Należy również pamiętać, aby do jednostki certyfikującej wyrób dostarczone zostały karty katalogowe zastosowanych elementów odpowiadających za bezpieczeństwo obwodów iskrobezpiecznych. W przypadku wprowadzenia zamienników dopuszczalna jest zamiana elementów na inne, lecz spełnione powinny być następujące warunki:

- powiadomienie o tym jednostki certyfikującej wyrób,
- wprowadzony zamiennik powinien posiadać parametry nie gorsze niż oryginalny element w zakresie wartości mocy, napięcia, natężenia prądu, czasu pracy i zakresu temperatur pracy,
- wprowadzony zamiennik powinien posiadać pisemną opinię projektanta urządzenia oraz pozytywną opinię notyfikowanej jednostki wystawiającej certyfikat w przypadku węzła NODE oraz SINK.

W tabelach 31 oraz 32 podane zostały wielkości charakterystyczne każdego elementu zapewniającego iskrobezpieczeństwo węzłów NODE oraz SINK, w tym:

- **Parametry znamionowe,**
- **Derating** - praktyka zmniejszania obciążenia elementu elektronicznego poniżej jego maksymalnych wartości parametrów znamionowych, aby zwiększyć niezawodność i przedłużyć jego żywotność.

Przedstawiono również obliczenia sprawdzające zgodność doboru podzespołów elektronicznych węzła typu NODE z wymaganiami pkt. 7.1, 7.5.2 oraz 8.4 normy PN-EN IEC 60079-11:2025-12 [85]. Schemat elektryczny węzła typu NODE przedstawiono w dodatku A (rys. A.1).

Obliczenia wielkości charakterystycznych obwodu elektrycznego węzła typu NODE, gdzie: $U_{\max}$ – znamionowe maksymalne napięcie pracy elementu $I_{\max}$ – znamionowy maksymalny prąd pracy elementu, $P_{\max}$ – znamionowa maksymalna moc rozpraszana na elemencie, I – obliczony maksymalny prąd płynący przez element, P – obliczona maksymalna moc rozpraszana na elemencie

Tabela 31.

Element	Parametry znamionowe oraz derating	Obliczenia / Uwagi	Spełnienie warunków
D1, D2, D6 PMEG1030	Dioda Schottky'ego $U_{\max} = \frac{2}{3} * 40 = 26 \text{ [V]}$ $I_{\max} = \frac{2}{3} * 2,1 = 1,4 \text{ [A]}$	$I = 1,7 * (I_{F1}) = 1,7 * (0,125) = 0,213 \text{ A}$	$P_{\max} > P$
F1 0154.125DR	Bezpiecznik 125mA/125V $I_{\max} = 0,125 * 1,7 = 0,213 \text{ A}$ $U_{\max} = 125 \text{ V}$ $R_{\min}(-20^{\circ}\text{C}) = 3,78 \Omega$	Zahermetyzowany, grubość zalewy > 1mm, $R_{\min}$ z pomiarów 10 sztuk w temperaturze -20°C	$U_{\max} > U_i \text{ (4V)}$
D17, D21, D22 MBR0530T1G	Dioda Schottky'ego $U_{\max} = \frac{2}{3} * 30 = 20 \text{ [V]}$ $I_{\max} = \frac{2}{3} * 0,5 = 0,33 \text{ [A]}$	Zabezpieczone bezpiecznikiem F1, $I_{\max F1} = 1,7 * I_{F1} = 1,7 * 0,125 = 0,213 \text{ A}$	$U_{\max} > U_i \text{ (4V)}$ $I_{\max} > I_{\max F1}$
R2, R3 SMD2512-10R-1%	Rezystor SMD 1206 $R = 10R - 1\% = 9R$ $P_{\max} = \frac{2}{3} * 1 = 0,67 \text{ [W]}$ $U_{\max} = \frac{2}{3} * 150 = 100 \text{ [V]}$	$P = ((1,7 * I_{F1})^2 * R_{2\min} / 2) * 1,5 = 0,31 \text{ W}$	$P_{\max} > P$ $U_{\max} > U_i$

Element	Parametry znamionowe oraz derating	Obliczenia / Uwagi	Spełnienie warunków
R8 SMD1206- 2R7-1%	Rezystor SMD 1206 $R=2R7-1\%=2R43$ $P_{\max} = \frac{2}{3} * 0,25 = 0,166 \text{ [W]}$ $U_{\max} = \frac{2}{3} * 150 = 100 \text{ [V]}$	$P=((1,7*I_{F1})^2*R8_{\min})*1,5$ $=0,165\text{W}$	$P_{\max} > P$ $U_{\max} > U_i$
R10 SMD1206- 2R2-1%	Rezystor SMD1206 $R=2R2 - 1\%= 2R$ $P_{\max} = \frac{2}{3} * 0,25 = 0,166 \text{ [W]}$ $U_{\max} = \frac{2}{3} * 150 = 100 \text{ [V]}$	$P=(1,7*I_{F1})^2*R10_{\min} *1,5$ $=0,15\text{W}$	$P_{\max} > P$ $U_{\max} > U_i$
Zalewa CW5631/ HY5610	Klasa termiczna F-155°C	Zalewa została zastosowana w celu: - zmniejszenia zdolności zapłonowej przez części gorące, - zmniejszenia wymaganych odstępów izolacyjnych, - wyeliminowania dostępu atmosfery wybuchowej	Temperatura elementów w stanie normalnej pracy nie przekracza dopuszczalnej temperatury pracy zalewy. W stanach awaryjnych elementy elektroniczne nie powodują uszkodzenia zalewy.

W przypadku każdego z elementów elektronicznych wyznaczono maksymalne wartości parametrów pracy korzystając z dokumentacji każdego z elementów. Warunki zostały wyznaczone przy zastosowaniu współczynników bezpieczeństwa określonych w normie ATEX dotyczącej obwodów iskrobezpiecznych.

Następnie obliczono wartości rzeczywiste w których pracować będą elementy oraz zweryfikowano brak przekroczenia wyznaczonych parametrów pracy poszczególnych elementów. W wyniku obliczeń oraz analizy nie stwierdzono przekroczenia wartości maksymalnych.

Zsumowano pojemności występujące w obwodach V_{DD} oraz V_{DD_RADIO} , zgodnie z tabelą A.2 normy PN-EN IEC 60079-11:2025-12 [85] wartości

pojemności w przypadku stosowanych napięć pracy nie spowodują zapalenia mieszanki wybuchowej.

Tożsąmą procedurę zastosowano w przypadku obwodów elektrycznych węzłów typu SINK (Tabela 32). Schemat elektryczny węzła typu SINK przedstawiono w dodatku B (rys. B.1).

Obliczenia wielkości charakterystycznych obwodu elektrycznego węzła typu SINK,
gdzie: $U_{\max}$ – znamionowe maksymalne napięcie pracy elementu $I_{\max}$ –
znamionowy maksymalny prąd pracy elementu, $P_{\max}$ – znamionowa maksymalna
moc rozpraszana na elemencie, I – obliczony maksymalny prąd płynący przez
elemen, P – obliczona maksymalna moc rozpraszana na elemencie

Tabela 32.

Element	Parametry znamionowe + derating (2/3 - jeśli ma zastosowanie)	Obliczenia / Uwagi	Spełnienie warunków
D1, D2 PMEG1030	Dioda Schottky $U_{\max} = \frac{2}{3} * 40 = 26 \text{ [V]}$ $I_{\max} = \frac{2}{3} * 2,1 = 1,4 \text{ [A]}$	$I = 1,7 * (I_{F1}) = 1,7 * (0,125) = 0,213 \text{ [A]}$	$P_{\max} > P$
F1 0154.125DR	Bezpiecznik 125mA/125 [V] $I_{\max} = 0,125 * 1,7 = 0,213 \text{ [A]}$ $U_{\max} = 125 \text{ [V]}$ $R_{\min(-20^{\circ}\text{C})} = 3,78 \text{ [\Omega]}$	zahermetyzowany grubość zalewy > 1mm $R_{\min}$ z pomiarów 10 szt. w temperaturze -20°C	$U_{\max} > U_i$ (6 [V])
D17,D21 MBR0530T1G	Dioda schottky $U_{\max} = \frac{2}{3} * 30 = 20 \text{ [V]}$ $I_{\max} = \frac{2}{3} * 0,5 = 0,33 \text{ [A]}$	Zabezpieczone bezpiecznikiem F1 $I_{\max F1} = 1,7 * I_{F1} = 1,7 * 0,125 = 0,213 \text{ [A]}$	$U_{\max} > U_i$ (6 [V]) $I_{\max} > I_{\max F1}$

Element	Parametry znamionowe + derating (2/3 - jeśli ma zastosowanie)	Obliczenia / Uwagi	Spełnienie warunków
D89-D96 MBR0530L	Dioda schottky $U_{\max} = \frac{2}{3} * 30 = 20 [V]$ $I_{\max} = \frac{2}{3} * 0,5 = 0,33 [A]$	Zabezpieczone bezpiecznikiem F1 $I_{\max F1} = 1,7 * I_{F1} =$ $1,7 * 0,125 = 0,213 [A]$	$U_{\max} > U_i$ (6 [V]) $I_{\max} > I_{\max F1}$
R2, R3 SMD2512- 10R-1%	Rezystor SMD 1206 $R = 10R - 1\% = 9R$ $P_{\max} = \frac{2}{3} * 1 = 0,67 [W]$ $U_{\max} = \frac{2}{3} * 150$ $= 100 [V]$	$P = ((1,7 * I_{F1})^2 * R_{2\min} / 2) * 1,5$ $= 0,31 W$	$P_{\max} > P$ $U_{\max} > U_i$
R8 SMD1206- 2R7-1%	Rezystor SMD 1206 $R = 2R7 - 1\% = 2R43$ $P_{\max} = \frac{2}{3} * 0,25$ $= 0,166 [W]$ $U_{\max} = \frac{2}{3} * 150$ $= 100 [V]$	$P = ((1,7 * I_{F1})^2 * R_{8\min}) * 1,5$ $= 0,165 W$	$P_{\max} > P$ $U_{\max} > U_i$

Element	Parametry znamionowe + derating (2/3 - jeśli ma zastosowanie)	Obliczenia / Uwagi	Spełnienie warunków
R10 SMD1206- 2R2-1%	Rezystor SMD1206 $R=2R2 - 1\%= 2R$ $P_{\max} = \frac{2}{3} * 0,25$ $= 0,166 [W]$ $U_{\max} = \frac{2}{3} * 150$ $= 100 [V]$	$P=(1,7*I_{F1})^2*R10_{\min} *1,5$ $=0,15 [W]$	$P_{\max} > P$ $U_{\max} > U_i$
Zalewa CW5631/ HY5610	Klasa termiczna F-155°C	Zalewa została zastosowana w celu: - zmniejszenia zdolności zapłonowej przez części gorące, - zmniejszenia wymaganych odstępów izolacyjnych, - wyeliminowania dostępu atmosfery wybuchowej	Temperatura elementów w stanie normalnej pracy nie przekracza dopuszczalnej temperatury pracy zalewy. W stanach awaryjnych elementy elektroniczne nie powodują uszkodzenia zalewy

W przypadku węzła typu SINK również nie stwierdzono przekroczenia wartości maksymalnych.

Zgodnie z wymaganiami punktu 6.6.1 normy PN-EN IEC 60079-11:2025-12 [85] maksymalna wartość mocy progowej źródła sygnałów radiowych w przypadku urządzeń grup I nie powinna przekraczać 6 W (przy czasie indukcji

zapłonu 200 μ s). Moc dostarczana do zasilania anteny układu radiowego P_{radio} wyniesie więc:

$$P_{\text{radio}} = \frac{(U_{\text{VDD_RADIO}})^2}{Z_{f_antena}} = \frac{36}{50} = 0,72 \text{ [W]} \quad (14)$$

gdzie:

$U_{\text{VDD_RADIO}}$ – maksymalne napięcie jakie może się pojawić na zasilaniu układu radiowego. W przypadku węzła typu NODE to 4[V], a węzła typu SINK to 6 [V]. Obliczenia mocy prowadzone były dla wyższego napięcia.

Z_{f_antena} - impedancją falową anteny [Ω].

Moc zasilania obwodu radia wynosi $P_{\text{VDD_RADIO}}=1,278\text{W}$, a maksymalna wartość mocy dostarczona do układu radiowego (tj. moc używana do propagacji fali radiowej) nie przekracza wartości mocy maksymalnej propagowanej ze źródła sygnałów radiowych określonej w normie PN-EN IEC 60079-11:2025-12 [85].

Węzeł typu SINK podłączany jest poprzez przepust kablowy do skrzyni ognioszczelnej komputera dołowego. Ponieważ wejścia węzła są iskrobezpieczne (o parametrach U_i oraz I_i) należy pamiętać o zasilaniu urządzenia z iskrobezpiecznego źródła spełniającego parametry wejściowe. Węzeł może być połączony magistralą komunikacyjną spełniającą wymagania wejściowe U_i oraz I_i węzła, lub powinien być połączony poprzez separator iskrobezpieczny zapewniający kompatybilność z parametrami wejściowymi urządzenia.

Przeprowadzone obliczenia i analizy elementów zabezpieczających wprowadzonych do obwodów elektrycznych węzłów sieci w celu sprawdzenia ich zgodności z wymaganiami dyrektywy ATEX potwierdziły, że (typu NODE i SINK) spełniają wymagania norm zharmonizowanych z dyrektywą ATEX (w tym norm PN-EN IEC 60079-0:2018-09 [84] i PN-EN IEC 60079-11:2025-12 [85]).

Wykonane szczegółowe analizy parametrów znamionowych i deratingu elementów elektronicznych, potwierdzają ich zgodność z wymaganiami dotyczącymi iskrobezpieczeństwa.

8. Podsumowanie

W monografii przedstawiono problem opracowania i walidacji algorytmu trasowania dla bezprzewodowych sieci sensorycznych stosowanych w warunkach zagrożenia wybuchem metanu i pyłu węglowego. W ramach prowadzonych badań opracowano algorytm trasowania przeznaczony do sieci sensorycznych wykorzystywanych w takich strefach, uwzględniający specyficzne warunki górniczo-geologiczne oraz ograniczenia energetyczne węzłów. Punktem wyjścia była analiza warunków pracy sieci oraz charakterystyka środowiska ścianowego, w którym monitoring pełni kluczową rolę dla bezpieczeństwa i ciągłości eksploatacji. Szczególną uwagę poświęcono elementom kompleksu ścianowego poddawanych stałej diagnostyce oraz potrzebie monitorowania parametrów sekcji obudowy zmechanizowanej, której stan decyduje zarówno o prawidłowym prowadzeniu ściany, jak i o wczesnym wykrywaniu zagrożeń takich jak obwały czy zwały skał. Wskazano także problemy związane z wiarygodnością pomiarów w tym środowisku oraz konieczność zapewnienia wysokiej niezawodności komunikacji w sieciach pracujących pod ziemią. Przedstawiono uwarunkowania techniczne i eksploatacyjne wynikające z wymogów bezpieczeństwa, w tym norm zharmonizowanych z dyrektywą ATEX, które definiują konstrukcję i dopuszczalne parametry urządzeń stosowanych w monitoringu kompleksu ścianowego. Analiza istniejących metod zarządzania transmisją danych w sieciach sensorycznych pozwoliła na porównanie różnych rodzin algorytmów trasowania, w tym podejść reaktywnych, proaktywnych oraz metod inspirowanych inteligencją roju. Testy symulacyjne potwierdziły, że rozwiązania oparte na algorytmach rojowych charakteryzują się największą stabilnością oraz najlepszymi parametrami komunikacyjnymi, przy czym wyniki te wymagają weryfikacji w warunkach rzeczywistych. W publikacji opisano implementację wybranych algorytmów bazowych oraz modyfikacje konieczne do ich uruchomienia w prototypie sieci składającej się z maksymalnie trzydziestu węzłów. Opracowano i uruchomiono środowisko walidacyjne, które umożliwiło testowanie działania algorytmów w warunkach odpowiadających pracy rzeczywistej sieci. Kluczowym elementem było dobranie i konfiguracja komponentów sprzętowych oraz programowych umożliwiających ocenę jakości trasowania, w tym modułów radiowych stanowiących rdzeń węzłów. Przeprowadzone badania pozwoliły na wstępne sprawdzenie działania algorytmów mrówkowych (ACO), optymalizacji rojem cząstek (PSO) oraz algorytmów pszczołich (BEE). Na tej podstawie wyłoniono rozwiązanie bazujące na PSO z elementami ACO jako najbardziej obiecujące pod względem stabilności

transmisji i elastyczności działania. Algorytm ten poddano następnie walidacji w sieci trzydziestowęzłowej, a zebrane wyniki przeanalizowano statystycznie, porównując go z klasycznymi algorytmami niewykorzystującymi inteligencji roju. Rezultaty badań jednoznacznie wskazują, że zastosowanie inteligencji roju umożliwia obniżenie czasu dostarczenia pakietów, stabilizację współczynnika pewności transmisji oraz zwiększenie przepustowości nawet przy rozbudowie sieci i ograniczeniach konstrukcyjnych wynikających z wymogów ATEX. Opracowany algorytm wykazuje zdolność adaptacji do zmian struktury sieci wynikających z przemieszczeń, uszkodzeń lub dołączania kolejnych węzłów, co czyni go szczególnie przydatnym w aplikacjach związanych z monitoringiem sekcji obudowy zmechanizowanej. Uzyskane wyniki otwierają perspektywy dalszego rozwoju algorytmów trasowania dla sieci sensorycznych stosowanych w górnictwie, zwłaszcza w kontekście rosnącej liczby urządzeń diagnostycznych w środowisku Przemysłu 5.0 i IIoT. Brak odpowiednio zoptymalizowanych i elastycznych systemów trasowania danych prowadzi do wzrostu ryzyka awarii, opóźnień w diagnostyce maszyn i urządzeń, a tym samym zwiększa zagrożenie dla bezpieczeństwa pracy górników. Monografia stanowi krok w kierunku zwiększenia niezawodności i efektywności transmisji danych w strefach zagrożonych wybuchem poprzez zastosowanie algorytmów inspirowanych inteligencją roju.

Literatura

- [1] Al-Karaki J. N., Kamal A. E.: Routing techniques in wireless sensor network: A survey. *IEEE Wireless Communication* 2004. Nr 11(6), s. 6-28. DOI: 10.1109/MWC.2004.1368893.
- [2] Bartoszek S., Rogala-Rojek J., Jasiulek D., Jagoda J., Turczyński K., Szyguła M.: Analysis of the Results from In Situ Testing of a Sensor In-Installed on a Powered Roof Support, Developed by KOMAG, Measuring the Tip to Face Distance. *Energies* 2021. Nr 14(24), 8541. DOI: 10.3390/en14248541
- [3] Belle B.K., van Zyl F.J., Du Plessis J.J.L.: Summary Report on Underground Road Header Environmental Control, Safety in mines research advisory committee, CSIR Miningtek and IMCL 2002. <https://researchspace.csir.co.za/server/api/core/bitstreams/3e37f70c-48c0-42cd-a290-9b201c832137/content> [dostęp z dn. 15.09.2025].
- [4] Biliński A., Kostyk T., Prusek S.: Zasady doboru obudowy zmechanizowanej dla wyrobisk ścianowych, *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie* 1997. Nr 3, s. 14-17.
- [5] Bołoz Ł.: Kombajny ścianowe do eksploatacji cienkich oraz cienkich i silnie nachylonych pokładów węgla kamiennego. *Mining-Informatics, Automation and Electrical Engineering* 2018. Nr 56.
- [6] Braginsky D., Deborah E.: Rumor routing algorithm for sensor networks. *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications* 2002, s. 22-31. DOI:10.1145/570738.570742.
- [7] Brodny J., Tutak, M.: Symulacja numeryczna jako narzędzie wspomagające ocenę zagrożenia metanowego w kopalni węgla kamiennego. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Organizacja i Zarządzanie* 2017. Nr 100, s. 45-59.
- [8] Cichy T., Sekta A.: Monitorowanie ciśnienia w stojakach obudowy zmechanizowanej w wybranych ścianach w Jastrzębskiej Spółce Węglowej SA. *Mining-Informatics, Automation and Electrical Engineering* 2019. Nr 57.

- [9] Chan F.T.S, Tiwari M. K.: *Swarm Intelligence: Focus on Ant and Particle Swarm Optimization*, I-Tech Education and Publishing, 2007, s. 64. DOI: 10.5772/5121.
- [10] Chmiel J., Kasprzyk K., Poppe L.: Wysoko wydajny kompleks ścianowy z kombajnem Elektra na napięcie 3300 V eksploatowany w kopalni „Wesoła”. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 2000. Nr 11, s. 35-44.
- [11] Datta N. N., Gopinath K.: A survey of routing algorithms for wireless sensor networks. *Journal of the Indian Institute of Science* 2006. Nr 86(6), s. 569-598.
- [12] Dezfouli B., Abu Bakar K., Lee M.: Multipath Routing in Wireless Sensor Networks: Survey and Research Challenges. *Sensors* 2012. Nr 12(1), s. 650-685. DOI: 10.3390/s120100650
- [13] Di Caro G., Ducatelle F., Gambardella L. M.: Swarm intelligence for routing in mobile ad hoc networks. In *Proceedings 2005 IEEE Swarm Intelligence Symposium 2005*, pp. 76-83. ISBN:0-7803-8916-6, DOI: 10.1109/SIS.2005.1501605
- [14] Di Renzone G.; Fort A.; Mugnaini M.; Pozzebon A.; Vignoli V.: Data Transmission from ATEX Boxes by Means of LoRa Technology for Industrial Internet of Things (IIoT) Applications. In *Proceedings of the IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Glasgow, UK, 2021, pp. 1-6. DOI: 10.1109/I2MTC50364.2021.9459915.
- [15] Dyczko A.: *Automatyzacja i monitorowanie procesu produkcyjnego w kopalniach podziemnych – polskie doświadczenia we wdrażaniu paradygmatu PRZEMYSŁU 4.0*. Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2023, ISBN 978-83-65593-30-6.
- [16] Figiel A.: Warunki bezpiecznego wykonywania badań oraz pomiarów wielkości elektrycznych i nieelektrycznych w wyrobiskach zagrożonych wybuchem. *Masz. Gór.* 2018. Nr 1, s. 84-88.
- [17] Gherbi C., Aliouat Z., Benmohammed M.: A survey on clustering routing protocols in wireless sensor networks. *Sensor Review* 2017. Nr 37(1), s. 12-25. DOI: 10.1108/SR-06-2016-0104.

- [18] Ghawry M. Z., Amran G. A., AlSalman H., Ghaleb E., Khan J., Al-Bakhrani A. A., Ullah, S. S.: An effective wireless sensor network routing protocol based on particle swarm optimization algorithm. *Wireless Communications and Mobile Computing* 2022. Nr 1, 8455065. DOI: 10.1155/2022/8455065.
- [19] Hou T., Kou Z., Wu J., Xu P., Zhang B., & Peng Y.: Positioning Control Strategy of Hydraulic Support Pushing System in Fully Mechanized Coal Face. *Electronics* 2023. Nr 12(17), 3628. DOI: 10.3390/electronics12173628.
- [20] Honysz J.: *Górnictwo T.1* Wyd. Śląsk 2011.
- [21] Heinzelman W. R., Chandrakasan A., Balakrishnan H.: Energy-efficient communication protocol for wireless micro sensor networks. *Proceedings of the IEEE Hawaii international conference on system sciences Maui, HI, USA 2000*. ISBN 0-7695-0493-0. DOI: 10.1109/HICSS.2000.926982.
- [22] Huang G., Zhou P., Zhang L.: Wireless sensor network for HVAC applications: a review. *12th International Conference on Sustainable Energy technologies (SET 2013)*.
- [23] Jabbar S.: Energy efficient strategy for throughput improvement in wireless sensor networks. *Sensors* 2015, Nr 15(2), 2473-2495. DOI: 10.3390/s150202473.
- [24] Jagoda J., Hetmańczyk M., Stankiewicz K.: Dispersed, self-organizing sensory networks supporting the technological processes. *Min. Mach.* 2021. Volume 39, Issue 2. DOI: 10.32056/KOMAG2021.2.2
- [25] Jagoda J., Stankiewicz K., Rogala-Rojek J., Hetmańczyk M.: Algorithm of Sensory Network Routing Operating in Explosion Hazard Zones. In: *International Congress on Technical Diagnostics*. Cham: Springer Nature Switzerland 2022, s. 76-185. DOI: 10.1007/978-3-031-31719-4_18.
- [26] Jagoda J., Woszczyński M., Polnik B., Falkowski-Gilski P.: HCI-Based Wireless System for Measuring the Concentration of Mining Machinery and Equipment Operators. *Applied Sciences* 2023. Nr 13(9), 5396. DOI: 10.3390/app13095396.

- [27] Jagoda J., Stankiewicz K., Bartoszek S., Rogala-Rojek J., Hetmańczyk M., Dymarek A.: Routing Algorithm for Sensor Network Monitoring the Condition of Mining Equipment. *Applied Sciences* 2024. Nr 14(11), 4393. DOI: 10.3390/app14114393.
- [28] Jasiulek D., Płonka M., Lubryka J.: System monitorowania geometrii sekcji obudowy zmechanizowanej. *Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji* 2019. Nr 8, s. 238-246.
- [29] Jasiulek D., Bartoszek S., Perůtka K., Korshunov A., Jagoda J., Płonka M.: Shield Support Monitoring System-operation during the support setting. *Acta Montanistica Slovaca* 2019. Nr 4, s. 391-401.
- [30] Jasiulek D., Skóra M., Jagoda J., Jura J., Rogala-Rojek J., Hetmańczyk M.: Monitoring the Geometry of Powered Roof Supports-Determination of Measurement Accuracy. *Energies* 2023. Nr 16(23), 7710. DOI: 10.3390/en16237710.
- [31] Płonka M., Rajwa S.: Utrudnienia w prowadzeniu sekcji obudowy zmechanizowanej obserwowane podczas pracy w dolnym zakresie jej wysokości roboczej, *Mining-Informatics, Automation and Electrical Engineering* 2018. Nr 4 (536), 55-64.
- [32] Jaszczuk M.: Systemy zintegrowanego sterowania układem technologicznym ściana wydobywcza – punkt załadowniczy. Monografia: Innowacyjne techniki i technologie mechanizacyjne. Centrum Mechanizacji Górnictwa KOMAG, Gliwice 2008. ISBN 978-83-60708-22-4.
- [33] Jaszczuk M., Pawlikowski A.: Adaptability Analysis of Four-Leg Hydraulic Support with Large Mining Height under Impact Dynamic Load. *Archives of Mining Sciences* 2017. Nr 62(4).
- [34] Jaszczuk M., Pawlikowski A.: Charakterystyki podpornościowe sekcji obudowy zmechanizowanej. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Górnictwo* 2006. Z. 274, s. 211-222.
- [35] Jin S., Zhou M., & Wu A. S.: Sensor network optimization using a genetic algorithm. In *Proceedings of the 7th world multiconference on systemics, cybernetics and informatics, Orlando, 30 March-2 April 2003*, pp. 109-116.

- [36] Jurado-Lasso F.F., Clarke K., Cadavid A.N., Nirmalathas A.: Energy-aware routing for software-defined multihop wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal* 2021. Nr 21(8), 10174-10182. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3059789.
- [37] Krauze K.: Urabianie skał kombajnami ścianowymi: podstawy doboru i projektowania elementów frezujących. Śląsk, 2000.
- [38] Krasucki K., Kudłacik T., Augustyniak K.: System monitoringu podporności RUFUS 3G służący do diagnostyki pracy zmechanizowanej obudowy ścianowej. *Mining–Informatics, Automation and Electrical Engineering* 2021. Nr 59(2), s. 20-32.
- [39] Kissel F.N.: Handbook for Dust Control in Mining, U.S. Department of Health And Human Services, 2003.
- [40] Kałuża G.: Stopień ochrony IP zapewniany przez obudowy urządzeń przemysłowych. *Maszyny Elektryczne: zeszyty problemowe* 2013. Nr 2(99), s. 317-323.
- [41] Kozyra J., Zieliński K.: Urządzenia elektryczne stosowane w obiektach zagrożonych wybuchem. *TTS Technika Transportu Szynowego* 2013. Nr 10.
- [42] Kharati E.: Using PSO and ABC Routing Algorithms Reducing Consumed Energy in Underwater Wireless Sensor Networks. *Iran J. Sci. Technol. Trans. Electr. Eng.* 2022. Nr 46, s. 367-380, DOI: 10.1007/s40998-021-00474-1.
- [43] Krupanek B., Bogacz R.: Protokoły routingu dla systemów Internetu Rzeczy - badania symulacyjne wybranych protokołów. *Przegląd Elektrotechniczny* 2018.
- [44] Latiff N. M. A., Tsimenidis C. C., Sharif B. S.: Energy-Aware Clustering for Wireless Sensor Networks using Particle Swarm Optimization, *IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Athens, Greece, 2007*, s. 1-5. DOI: 10.1109/PIMRC.2007.4394521.
- [45] Lee M., Dezfouli B., Abu Bakar K: Multipath routing in wireless sensor networks: Survey and research challenges. *Sensors*. 2012(1).

- [46] Lindsey S., Raghavendra C. S.: PEGASIS: Power efficient gathering in sensor information systems. Proceedings of the IEEE. Aerospace conference, Big Sky, MT, USA, 2002, pp. 3-3. DOI: 10.1109/AERO.2002.1035242.
- [47] Manjeshwar A., Dharma P. Agrawal: TEEN: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless sensor networks., 2001, Proceedings 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium. IPDPS 2001, San Francisco, CA, USA, 2001, pp. 2009-2015, DOI: 10.1109/IPDPS.2001.925197.
- [48] Manjeshwar A., Dharma P. Agrawal: APTEEN: A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks. Proceedings 16th Parallel and distributed processing symposium, Ft. Lauderdale, FL, USA, 2002, pp. 8. DOI: 10.1109/IPDPS.2002.1016600.
- [49] Nguyen M.T., Teague K.A.: Compressive sensing based random walk routing in wireless sensor networks. Ad Hoc Networks 2017. Nr 54, s. 99-110. DOI: 10.1016/j.adhoc.2016.10.009.
- [50] Ostrihansky R.: Eksploatacja podziemna złóż węgla kamiennego. Katowice 1996.
- [51] Piechota S.: Technika podziemnej eksploatacji złóż. Część I. Kraków 2004.
- [52] Praveena K. S., Bhargavi K., Yogeshwari K. R.: Comparision of PSO Algorithm and Genetic Algorithm in WSN using NS-2. International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication (CTCEEC), Mysore, India, 2017, pp. 513-516. DOI: 10.1109/CTCEEC.2017.8455121.
- [53] Priyanka S., Tanmay K.: A review on specification evaluation of broadcasting routing protocols in VANET, Computer Science Review 2021, Volume 41, 100418. DOI: 10.1016/j.cosrev.2021.100418.
- [54] Prusek S., Rajwa S., Wrana A., Krzemień A.: Assessment of roof fall risk in longwall coal mines. International Journal of Mining, Reclamation and Environment 2017. Nr 31(8), 558–574. DOI: 10.1080/17480930.2016.1200897

- [55] Prusek S., Płonka M., Walentek A.: Applying the ground reaction curve concept to the assessment of shield support performance in longwall faces. *Arabian Journal of Geosciences* 2016. Nr 9, 167, DOI: 10.1007/s12517-015-2171-2.
- [56] Pytlik A., Paczeński K., Kot D., Krodziewski J.: System pomiarowy do badania statycznego i dynamicznego ciśnienia w stojakach hydraulicznych sekcji obudowy zmechanizowanej. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa* 2009. Nr 47(4), s. 48-59.
- [57] Rajwa S., Prusek S., Szuścik J., Gaska R.: Prowadzenie ściany pod gruzowiskiem zawałowym w warunkach zmiennej grubości pozostawionej warstwy przyspągowej. *Przegląd Górniczy* 2017. Nr 6, s. 33-37.
- [58] Smolarek A., Malinowski T.: Protokoły trasowania w sieciach ad hoc. *Zeszyty Naukowe Warszawskiej Wyższej Szkoły Informatyki* 2012. Nr 6(8), s. 47-60.
- [59] Smużyński J.: *Obudowy zmechanizowane*. Śląskie wydawnictwo techniczne, 1993
- [60] Stankiewicz K.: A method for the self-organization of a sensor network in belt conveyor exploitation. *Problemy Eksploatacji* 2016. Nr 3, s. 145-154.
- [61] Stankiewicz K., Jagoda J., Tonkins M.: Intelligent algorithms for routing sensory networks operating in explosion hazard zones. *Mining Science* 2021, 28. DOI: 10.37190/MS212808.
- [62] Stoiński K., Kostyk T.: Sposób określania upodatkowania sekcji zmechanizowanej obudowy ścianowej-metodą analityczną. *Maszyny Górnicze* 2005, Nr 23(3), s. 12-17.
- [63] Szelka M., Woszczyński M., Jagoda J., Kamiński P.: Wireless Leak Detection System as a Way to Reduce Electricity Consumption in Ventilation Ducts. *Energies* 2021. Nr 14(13), 3774. DOI: 10.3390/en14133774.
- [64] Szurgacz D., Bazan Ł., Trzop K., Diederichs R.: Bezprzewodowy system wizualizacji parametrów ciśnienia zmechanizowanej obudowy

- ścianowej na przykładzie polskich kopalń. *Mining–Informatics, Automation and Electrical Engineering* 2020. Nr 58(2), s. 15-22.
- [65] Szyguła M.: Rozwój konstrukcji sekcji obudowy zmechanizowanej w górnictwie węgla kamiennego w Polsce. *Maszyny Górnicze* 2013. Nr 2, s. 30-38.
- [66] Szweda S., Szyguła M., Mazurek K.: Czynniki wpływające na postać konstrukcyjną i parametry techniczne sekcji ścianowej obudowy zmechanizowanej. Część 1 Czynniki naturalne, techniczne i konstrukcyjne. Instytut Techniki Górniczej KOMAG 2016, ISBN 978-83-65593-01-6
- [67] Świątek J., Stoiński K., Styrylski K.: A contribution to the design of powered roof support for operations in a rockburst-hazardous environment. *Mining – Informatics, Automation And Electrical Engineering* 2020. Nr 2, s. 59-64, DOI: 10.7494/miag.2020.2.542.59
- [68] Turek M.: Eksploatacja podziemna pokładów węgla kamiennego - współczesne wyzwania. Cz. 9, System ścianowy podłużny z zawalem stropu w pokładach o małym nachyleniu. *Wiadomości Górnicze* 2009. Tom 60, nr 12, s. 747-757.
- [69] Wang D., Zeng X., Wang G., Li R.: Adaptability Analysis of Four-Leg Hydraulic Support with Large Mining Height under Impact Dynamic Load. *Shock and Vibration* 2022, 1, 2168871. DOI: 10.1155/2022/2168871.
- [70] Wojaczek A., Wojaczek A.: Monitoring środowiska i maszyn w kopalni podziemnej. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk* 2017. Nr 99, s. 57-70.
- [71] Wedde F. i inn.: BeeAdHoc: An Energy Efficient Routing Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks Inspired by Bee Behavior. In *Proceedings of the 7th annual conference on Genetic and evolutionary computation (GECCO '05)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2005, 153–160. DOI: 10.1145/1068009.1068034
- [72] Woszczyński M., Jasiulek D., Jagoda J., Kaczmarczyk K., Matusiak P., Kowol D., Marciniak B.: Monitoring of the mining waste neutralization

- facility of LW Bogdanka. *Acta Montanistica Slovaca* 2023. Nr 28(1), s. 236-249, DOI: 10.46544/AMS.v28i1.19.
- [73] Voigt T., Ritter H., & Schiller J.: Solar-aware routing in wireless sensor networks. *Personal Wireless Communications, IFIP-TC6 8th International Conference, PWC 2003, Venice, Italy, September 23-25, 2003*, DOI: 10.1007/978-3-540-39867-7_79.
- [74] Xu Y., Heidemann J., Estrin D.: Geography informed energy conservation for ad-hoc routing. *Proceedings of the 7th annual international conference on mobile computing and networking*, 2021.
- [75] Yu Y., Govindan R., Estrin D.: Geographical and energy aware routing: A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks. *Technical report, UCLA Computer Science Department*, 2001.
- [76] Zając C.: Materiały dydaktyczne dla zawodu: technik górnictwa podziemnego, witryna internetowa www.czek.eu (dostęp: 15.02.2024)
- [77] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/34/UE z dnia 26 lutego 2014 w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w atmosferze potencjalnie wybuchowej (ATEX).
- [78] Ustawa z dnia 13 kwietnia 2016 r. o systemach oceny zgodności i nadzoru rynku (Dz.U. 2016 poz. 542; tj. Dz.U. 2025 poz. 568).
- [79] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 6 czerwca 2014 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. (Dz.U. 2014 poz. 817).
- [80] Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 roku w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych (Dz.U. 2017 poz. 118).
- [81] Rozporządzenie Ministra Rozwoju z dnia 6 czerwca 2016 r. w sprawie wymagań dla urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w atmosferze potencjalnie wybuchowej (Dz.U. 2016 poz. 817).
- [82] PN-EN ISO 340:2022-12 Taśmy przenośnikowe – Wymagania dotyczące charakterystyka palności w skali laboratoryjnej. Wymagania i metody badań.
- [83] PN-EN 60529:2003 Stopnie ochrony zapewnianej przez obudowy (kod IP).
- [84] PN-EN IEC 60079-0:2018-09 Atmosfery wybuchowe – Część 0: Urządzenia – Podstawowe wymagania.

- [85] PN-EN IEC 60079-11:2025-12 Atmosfery wybuchowe – Część 11: Zabezpieczenie urządzeń za pomocą iskrobezpieczeństwa „i”.
- [86] PN-EN ISO/IEC 80079-38:2017-02 Atmosfery wybuchowe – Część 38: Urządzenia i komponenty stosowane w atmosferach wybuchowych występujących w podziemnych wyrobiskach zakładów górniczych.
- [87] Strona internetowa firmy Famur: <https://famur.com/urzadzenia-dla-gornictwa-podziemnego-obudowy-zmechanizowane/> (dostęp: 20.08.2025).
- [88] Strona internetowa <https://pl.all.biz/przenosnik-zgrzeblowy-scianowy-g89921> (dostęp: 15.09.2025).
- [89] Strona internetowa <https://www.directindustry.com/prod/famur/product-58723-2031381.html> (dostęp: 10.09.2025).
- [90] Strona internetowa <https://www.slideserve.com/elia/grupa-famur-nowe-kierunki-modernizacji-podziemnej-eksploatacji-węgla> (dostęp: 11.09.2023)
- [91] Strona internetowa <https://apautomatyka.pl/klasyfikacja-strefy-ex/> (dostęp: 15.08.2025).
- [92] Strona internetowa <https://www.bluerange.io/docs/fruitymesh/index.html> (dostęp: 15.10.2025).
- [93] Strona internetowa <https://wzorcowaniamiernikow.pl/k/bm878-multimetr-rezystancja-izolacji/> (dostęp: 17.10.2025).
- [94] Strona internetowa <https://zortrax.com/pl/filaments/z-esd/> (dostęp: 09.10.2025).
- [95] Strona internetowa <https://www.hempel.com/pl-pl/produkty/hempaprime-multi-500-atex-45951> (dostęp: 05.02.2023).

Algorytm trasowania sieci sensorycznych z zastosowaniem inteligencji roju

Streszczenie

Współczesne przemysły wydobywcze stają przed coraz większymi wyzwaniami związanymi z zapewnieniem bezpieczeństwa oraz efektywności prowadzonych procesów technologicznych. Szczególne znaczenie ma to w kontekście eksploatacji kopalń podziemnych, gdzie zagrożenia wybuchem metanu i pyłu węglowego stanowią poważne ryzyko dla pracowników oraz ciągłości produkcji. W tym obszarze niezbędne jest wdrażanie nowoczesnych systemów monitoringu i automatyzacji, które umożliwiają wczesne wykrywanie zagrożeń oraz optymalizację pracy urządzeń zabezpieczających.

Niniejsza monografia opiera się na badaniach przeprowadzonych w ramach pracy doktorskiej, których celem było opracowanie i walidacja innowacyjnego algorytmu trasowania sieci sensorycznych, wykorzystujących inteligencję roju, dedykowanego do monitoringu sekcji obudowy zmechanizowanej. Algorytm ten ma na celu zapewnienie niezawodnej i elastycznej organizacji przesyłu informacji w wymagających warunkach kopalnianych, w szczególności w strefach zagrożonych wybuchem.

Kluczowym elementem realizowanych badań było stworzenie dedykowanego środowiska walidacji umożliwiającego kompleksowe testowanie opracowanego algorytmu oraz sprzętu sensorycznego na zgodność z wymaganiami dyrektywy ATEX. Przeprowadzone analizy i testy pozwoliły na optymalizację działania sieci, uwzględniając parametry takie jak przepustowość, auto-konfigurowalność czy czas dostarczania danych, co bezpośrednio przekłada się na podniesienie poziomu bezpieczeństwa i efektywności eksploatacji.

Utylitarnym aspektem pracy jest wsparcie automatyzacji procesu prowadzenia ścian wydobywczej oraz rozwój systemów predykcji zagrożeń, takich jak tąpnięcia i obwały skał. Integracja danych z sieci sensorycznych z systemami nadrzędnymi umożliwia podejmowanie świadomych decyzji zarządczych, co sprzyja minimalizacji ryzyka oraz poprawie bezpieczeństwa pracy.

Ze względu na skomplikowane procedury związane z certyfikacją urządzeń i dostępem do kopalnianych podziemi, badania in-situ zostaną przeprowadzone

w kolejnych etapach, co pozwoli na pełną weryfikację algorytmu w rzeczywistych warunkach.

Monografia stanowi ważny wkład w rozwój nowoczesnych technologii monitoringu i automatyzacji w przemyśle wydobywczym, tworząc solidną bazę dla dalszych badań oraz praktycznych wdrożeń.

Sensor Network Routing Algorithm Using Swarm Intelligence

Abstract

State-of-the-art mining industries face increasing challenges for ensuring the safety and efficiency in technological processes. This is especially critical in underground mining industry, where the risks of methane and coal dust explosions pose serious threats to workers and operational continuity. In this context, implementation of advanced monitoring and automation systems is essential for early detection of hazard and optimization of equipment safe operation.

This monograph is based on research work as part of a doctoral dissertation aimed at developing and validating the innovative sensor network routing algorithm using the swarm intelligence, dedicated to monitoring the powered roof supports. This algorithm is designed to ensure reliable and flexible data transmission in demanding conditions of mining environment, particularly in the potentially explosive atmosphere.

Creation of a dedicated validation environment for comprehensive testing of the developed algorithm and sensor hardware for conformity with ATEX directive requirements was a key aspect of the research work. The analyses and tests allowed for optimization of network operating parameters such as throughput, self-configuration, and data delivery time, directly contributing to enhanced safety and operational efficiency.

The practical objective of this work is to support the automation of longwall mining operations and development of hazard prediction systems for phenomena such as rock bursts and collapses. Integration of data from sensor networks with supervisory systems enables taking the right decisions, reducing risks and improving the work safety.

Due to the complex certification procedures and restricted access to underground mining sites, in-situ testing is planned for subsequent research work phases, which will allow full validation of the algorithm in real conditions.

The monograph represents an important contribution to the development of modern monitoring and automation technologies in the mining industry, providing a solid foundation for further research and practical implementations.

ISBN 978-83-65593-52-8