

**WYDZIAŁ MECHANICZNY TECHNOLOGICZNY**  
**Katedra Automatykacji Procesów Technologicznych**  
**i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania**  
**Politechnika Śląska**

**PRACA DOKTORSKA**

mgr inż. Jerzy Jagoda

**„Opracowanie oraz walidacja algorytmu trasowania sieci  
sensorycznych, z zastosowaniem inteligencji roju”**

Promotor: dr hab. inż. Mariusz Hetmańczyk, prof. PŚ

*Gliwice 2024*



## Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń .....	5
1. Wprowadzenie.....	6
1.1. Wstęp.....	6
1.2. Geneza problemu.....	7
1.3. Cel i zakres pracy .....	8
2. Analiza stanu wiedzy w zakresie technologii urabiania .....	10
2.1. Sekcja obudowy zmechanizowanej.....	13
2.2. Systemy monitorowania podporności i geometrii obudowy zmechanizowanej – przegląd .....	17
2.3. Warunki pracy w podziemiach kopalń węgla kamiennego, a wymagania stawiane urządzeniom.....	20
3. Algorytmy trasowania sieci sensorycznych .....	24
3.1. Podstawowe zagadnienia w zakresie algorytmów trasowania sieci sensorycznych .....	24
3.2. Testy symulacyjne algorytmów trasowania - przegląd wyników badań.....	28
3.3. Podsumowanie analizy stanu wiedzy .....	34
4. Opracowanie algorytmu trasowania.....	36
4.1. Koncepcja implementacji algorytmów w modelu sieci sensorycznej.....	37
4.1.1. Algorytm optymalizacji rojem cząstek .....	37
4.1.2. Algorytm mrówkowy.....	39
4.1.3. Algorytm pszczeli .....	41
4.1.4. Metoda realizacji badań .....	42
4.2. Koncepcja implementacji algorytmu w prototypie sieci sensorycznej .....	42
4.2.1. Implementacja.....	47
4.2.2. Metoda realizacji badań .....	49
5. Opracowanie środowiska walidacji sieci sensorycznych.....	50
5.1. Wybór modułów sprzętowych oraz topologii sieci.....	52
5.2. Prototypowanie oprogramowania modułów radiowych nRF52.....	62
5.3. Opracowanie oprogramowania mikrokomputera typu Raspberry Pi.....	63
5.4. Opracowanie oprogramowania analizującego dane na komputerze klasy PC.....	68
6. Badania sieci sensorycznej.....	72
6.1. Badania modelu sieci sensorycznej - struktura z 3 węzłami .....	72
6.2. Badania prototypu sieci sensorycznej - sieć z 30 węzłami .....	76
6.3. Analiza statystyczna parametrów sieci .....	84

7. Analiza wykonalności węzłów sieci sensorycznej zgodnie z wymaganiami dyrektywy ATEX.....	112
7.1. Analiza spełnienia wymagań dyrektywy ATEX przez obudowę węzłów sieci.....	112
7.2. Analiza spełnienia wymagań dyrektywy ATEX przez obwody elektryczne węzłów projektowanej sieci sensorycznej .....	117
8. Podsumowanie i dalsze kierunki badań .....	124
Literatura .....	127
DODATKI.....	134
Dodatek A - Schematy elektryczne oraz modele 3D pojedynczych węzłów sieci typu NODE (pracujących w charakterze inklinometrów oraz czujników ciśnienia).....	134
Dodatek B - Schematy elektryczne oraz modele 3D pojedynczych węzłów sieci typu SINK. ...	136

## 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 <sub>j</sub> .
$\tau$	–	ilość feromonu pozostawionego w poszczególnych węzłach,
$\phi$	–	wartość lokalnej funkcji kryterium,
l	–	liczba sąsiadów węzła j,
$\alpha, \beta$	–	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

## 1.1. Wstęp

Obecnie zarządzanie procesem produkcyjnym jest możliwe również dzięki informacjom przekazywanym do przełożonych w czasie rzeczywistym. W obszarze wydobywania węgla kamiennego głównym celem procesu zarządzania jest maksymalizacja wydajności wydobywania oraz bezpieczeństwa prowadzonego procesu eksploatacji złóż. Przepisy dotyczące prawa geologicznego i górnictwa nakładają szereg zobowiązań na przedsiębiorców, które obejmują takie aspekty jak utrzymanie rejestru obecności w zakładzie górnictwa, monitorowanie potencjalnych zagrożeń środowiskowych oraz nadzorowanie przebiegu procesów technologicznych.

W kontekście zapewnienia bezpieczeństwa górników pracujących w kopalniach podziemnych, istotnym elementem jest nie tylko bieżąca informacja o ich lokalizacji i stanie zdrowia, atmosferze i warunkach technicznych kopalni, ale również ściśle monitorowanie efektywności kluczowych maszyn i urządzeń górnictwa używanych w zakładach górnictwa. Monitoring i diagnostyka maszyn i urządzeń górnictwa w całym procesie urabiania, jest obecnie elementem niezbędnym oraz zapewniającym prawidłowe, bezpieczne i wydajne prowadzenie prac wydobywczych [70, 24, 26].

Monitoring oraz diagnostyka stosowane są na każdym etapie procesu wydobywania, natomiast kontrola oraz analiza danych pozyskiwanych z systemów nadzorujących przebieg prac odbywa się w pomieszczeniach dyspozytorskich [15, 70]. Informacje przesyłane do central dyspozytorskich, pozyskiwane są ze specjalnych urządzeń z czujnikami. Czujniki służą do diagnozowania maszyn i urządzeń poprzez wykrywanie stanów awaryjnych oraz kontrolę przebiegu eksploatacji. Ponadto, są one stosowane do celu automatyzacji procesu urabiania oraz pełnią istotną rolę w systemach sterowania pracą maszyn i urządzeń. Przesyłanie informacji do central dyspozytorskich poprzez wewnętrzną sieć komunikacyjną znacznie przyspiesza procesy związane m.in. z utrzymaniem prawidłowego stanu eksploatacyjnego oraz serwisowaniem urządzeń. Rozwój sieci diagnostyczno-sterujących ma również na celu urzeczywistnienie autonomicznego procesu urabiania, co przekłada się na zapewnienie bezpieczeństwa. Opisany aspekt jest istotny zwłaszcza ze względu na fakt, że nowe złoża węgla kamiennego znajdują się na głębokościach przekraczających 1000 metrów, co naraża maszyny na zwiększone ryzyko wypadków lub awarii z uwagi na specyficzne warunki górnictwa-geologiczne [15, 69].

Informacje przesyłane z sieci czujników do central dyspozytorskich służą nie tylko diagnostyce urządzeń oraz automatyzacji sterowania maszynami, lecz także do prognozowania zagrożeń górnictwa. Dzięki tym danym istnieje możliwość predykcji wystąpienia zawałów, obwałowań czy tąpnięć, co umożliwia skuteczne wdrożenie procesów zaradczych. Proces adaptacji założeń przemysłu 5.0 oraz Internetu Rzeczy IIoT (ang. Industrial Internet of Things) w procesie urabiania postępuje w

bardzo szybkim tempie. Rozwój systemów diagnostycznych, mimo niewątpliwych korzyści, niesie ze sobą także wyzwania związane z rozwiązywaniem nowo powstałych problemów [28, 29, 30].

## 1.2. Geneza problemu

W rozbudowanych sieciach sensorycznych wyrobisk górniczych istotne jest skonstruowanie efektywnej organizacji transmisji danych, mającej na celu zapewnienie niezawodności działania, elastycznej konfiguracji oraz bezpieczeństwa eksploatacyjnego [22, 61, 2, 31].

Niezawodność działania oznacza pewność, że dane zarejestrowane przez czujniki dotrą do punktu dyspozytorskiego. Należy, więc wpłynąć na zmniejszenie awaryjności czujników oraz przyspieszyć proces identyfikacji niesprawności i wymiany w przypadku wystąpienia ich awarii [25, 27]. W celu zwiększenia efektywności powinna zostać zapewniona elastyczna konfiguracja ze względu na podniesienie poziomu efektywności procesów serwisowych i implementacji sieci w miejscu przeznaczenia. Implementacja nowo powstającej sieci powinna być uproszczona i łatwa w realizacji. Ponadto powinna być możliwa przebudowa struktury sieci, a adaptacja do nowej konfiguracji powinna przebiegać z dynamicznym włączaniem nowych czujników i urządzeń.

Obligatoryjnie sieć powinna zapewniać bezpieczeństwo eksploatacyjne. Większość nowo powstających sieci czujników montowanych w urządzeniach i maszynach górniczych posiada bezprzewodowe interfejsy transmisji danych, a same czujniki zasilane są bateryjnie. Czujniki również w zakresie swojej konstrukcji i zasadach działania muszą spełniać wymogi pozwalające na pracę w strefach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego (wymogi określone zostały w europejskiej dyrektywie ATEX - fr. Atmosphères Explosibles). Nierzadko zapewnienie bezpieczeństwa poprzez odpowiednią konstrukcję elektryczną urządzeń wiąże się z większym zużyciem energii, co w efekcie skutkuje krótszym czasem pracy baterii. W związku z tym istnieje konieczność optymalizacji zużycia energii, aby zachować bezpieczeństwo pracy sieci oraz jej funkcjonalność [16, 40, 79].

W celu umożliwienia mobilności i łatwej implementacji sieci czujników, większość z nich często pracuje w oparciu o inteligentne algorytmy trasowania [70]. Dodatkowo, zaawansowane algorytmy transmisji sieci czujników umożliwiają efektywne zarządzanie przepływem danych w rozległej infrastrukturze sieciowej.

### 1.3. Cel i zakres pracy

Celem naukowym pracy doktorskiej jest opracowanie oraz walidacja algorytmu trasowania sieci sensorycznych, z zastosowaniem inteligencji roju, pracujących w monitoringu sekcji obudowy zmechanizowanej.

W pracy skupiono się na następujących zagadnieniach:

- wyborze algorytmu bazowego stanowiącego podstawę opracowywanego autorskiego algorytmu - w ramach pracy przeanalizowano zasadę działania algorytmów trasowania, dzięki czemu wyselekcjonowano algorytmy bazowe,
- opracowaniu środowiska walidacji - obejmującego etapy: ostatecznej weryfikacji rozwiązań sprzętowych, definicję bazowych węzłów sieci sensorycznej, opracowanie aplikacji nadzorującej pracę czujników, dobór odpowiedniego środowiska programistycznego oraz przeprowadzenie testów funkcjonalnych opracowanego środowiska walidacji,
- przeprowadzeniu procesu walidacji algorytmu trasowania w opracowanym środowisku - obejmującego iteracje implementacji algorytmu w sieci sensorycznej, badanie wpływu algorytmu na parametry sieci czujników pomiarowych (takich jak przepustowość, auto konfigurowalność oraz czas dostarczenia danych), jak również wprowadzanie poprawek w algorytmie,
- analizie zastosowanych rozwiązań sprzętowych poszczególnych węzłów pod względem spełnienia wymogów dyrektywy ATEX - w szczególności urządzeń pracujących w strefach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego,
- analizie możliwości implementacji opracowanego algorytmu w warunkach panujących w kopalni.

Sformułowana została teza pracy w następującej postaci:

*Zastosowanie algorytmów trasowania sieci sensorycznych (pracujących w oparciu o inteligencję roju) zaimplementowanych w strefach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego zapewni odpowiednią organizację przesyłu informacji, zwiększając jednocześnie wymaganą niezawodność działania, elastyczną konfigurację oraz wymagany poziom bezpieczeństwa eksploatacyjnego.*

Utylitarnym celem badań jest automatyzacja procesu prowadzenia przebiegu pracy ściany wydobywczej oraz opracowanie systemu predykcji zagrożeń takich jak tąpnięcia i obwały skał.

Opracowany algorytm ma na celu wspomaganie działania sieci sensorycznych monitorujących pracę sekcji obudowy zmechanizowanej. Dane pozyskane z sieci sensorycznych są niezbędnym



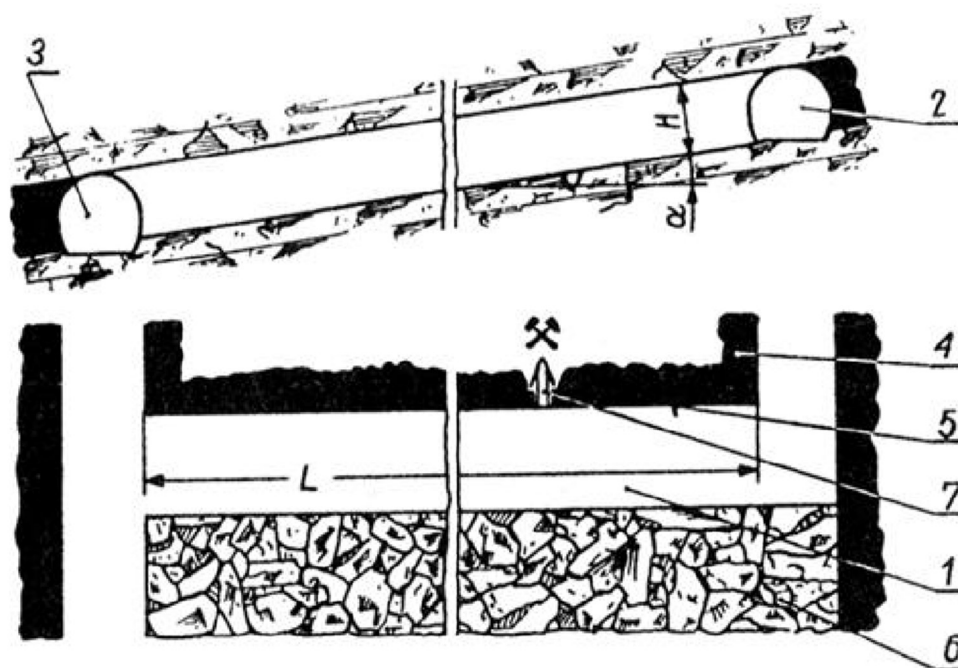
elementem używanym w autonomicznym sterowaniu pracą sekcji obudowy zmechanizowanej, co z kolei prowadzi do wsparcia automatyzacji całego procesu wydobywania.

Jednym z podstawowych aspektów procesu automatyzacji jest odpowiednie sterowanie położeniem sekcji obudowy zmechanizowanej, aby zapewnić odpowiednie podparcie stropu wyrobiska (zapewnienie odpowiedniej wartości podporności sekcji). Dane pozyskane z monitoringu pracy sekcji obudowy zmechanizowanej, poddane analizie przez systemy nadrzędne, mogą służyć do predykcji zagrożeń takich jak tąpnięcia i obwały skał. Informacja ta pozwala jednostkom zarządzającym procesem wydobywania podejmować odpowiednie decyzje na temat dalszego sposobu prowadzenia procesu wydobywania i podjęcie decyzji o wdrożeniu odpowiednich procedur bezpieczeństwa. Badania in-situ nie zostały przewidziane w ramach realizacji pracy ze względu na nieprzewidywalny czas związany z procedurami jakich należy dokonać przed zwiezieniem urządzenia prototypowego w podziemiu kopalń (konieczność certyfikacji urządzenia przez jednostkę zewnętrzną, procedury związane z pozwoleniami na zjazd w podziemiu kopalń). Uznano za najważniejszą realizację prac badawczych, które mogłyby być zagrożone w przypadku wydłużających się procedur. Kolejnym etapem prac będzie przeprowadzenie badań in-situ, które będą stanowić rozszerzenie niniejszej pracy i pozwolą na pełną walidację algorytmu w warunkach rzeczywistych.

## 2. Analiza stanu wiedzy w zakresie technologii urabiania

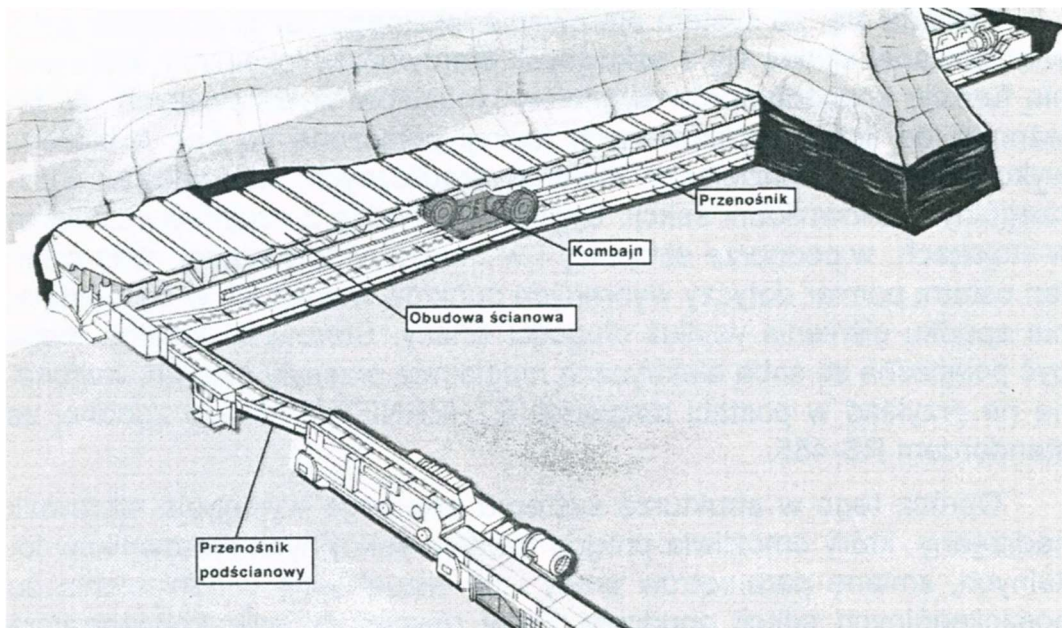
Podstawowym systemem wydobywczym w polskim przemyśle węglowym jest system ścianowy. Metoda ta jest jedną z najwydajniejszych i najbezpieczniejszych technik wydobywania węgla, szczególnie w kopalniach z głębokimi pokładami. Do jej zalet należą: wysoka wydajność, możliwe zastosowania automatyzacji i mechanizacji, maksymalne wykorzystanie pokładów złoża, redukcja zagrożeń naturalnych, efektywna wentylacja i kontrola gazów, minimalny zakres robót przygotowawczych oraz lepsza kontrola nad subsydencją.

Eksploatacja systemem ścianowym polega na rozcięciu pokładu węglowego poprzez wykonanie chodników, które następnie zostają połączone przecinką ścianową o wymiarze równym długości ściany. Utworzone w ten sposób wyrobiska tworzą tzw. przodek wydobywczy (Rys. 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,  $\alpha$  – kąt nachylenia podłużnego ściany, H – wysokość ściany, L – długość ściany) [37]

Głównymi elementami opisanego systemu są: kombajn ścianowy, zmechanizowana obudowa ścianowa oraz przenośnik ścianowy (przenośnik zgrzeblowy). Elementy systemu ścianowego przedstawiono na rysunku 2.



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

Kombajn ścianowy (Rys. 3) to podstawowe urządzenie używane w procesie wydobywania węgla kamiennego. Kombajn ma za zadanie odspajanie skały (głównie węgla) od calizny ściany i ładowanie urobku na przenośnik ścianowy. Maszyna porusza się po konstrukcji przenośnika ścianowego za pomocą mechanizmu posuwu. Kombajn wyposażony jest w dwa organy urabiające, które poruszają się wzdłuż ściany rozdrabniając jednocześnie węgiel. Organ wyprzedzający skrawa górną warstwę calizny, natomiast drugi organ urabia dolną część calizny. Kombajny są zaprojektowane do pracy w trudnych warunkach geologicznych, co zwiększa efektywność wydobywania i minimalizuje ryzyko związane z pracą ludzi w przodku [68].



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

Przenośnik ścianowy, znany także jako przenośnik zgrzeblowy, służy do transportu urobku wzdłuż ściany do głównego systemu transportowego kopalni. Jest to wytrzymały, mechaniczny system transportowy, który umożliwia ciągły transport węgla z miejsca urabiania do punktu odbioru.

Przeñośnik zgrzeblowy (Rys. 4) składa się z elementów ciągnowych, które przesuują materiał za pomocą zabieraków przymocowanych do łańcucha. Opisane urządzenie jest zaprojektowane tak, aby działało w ciężkich warunkach górniczych, zapewniając równocześnie niezawodność i wysoką wydajność [10].



Rys. 4. Widok przeñośnika zgrzeblowego firmy Glinik [80]

Zmechanizowana obudowa ścianowa (Rys. 5) zapewnia stabilność i bezpieczeństwo wyrobiska, a jej głównym zadaniem jest ochrona personelu i pozostałych urządzeń pracujących w ścianie. Składa się z sekcji hydraulicznych, które przesuują się wzdłuż ściany w miarę postępu prac urabiających. Sekcje chronią wyrobisko przed osuwaniem się skał i zapadaniem stropu, co jest kluczowe w zakresie poprawy bezpieczeństwa pracy górników [10].

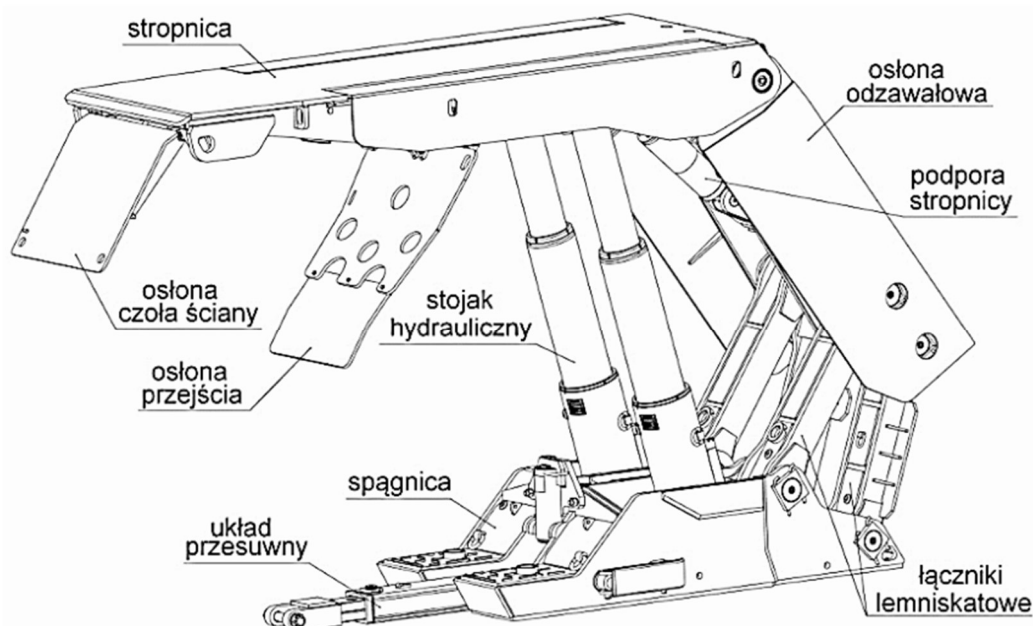


Rys. 5. Widok sekcji obudowy zmechanizowanej firmy Famur [82]

Ostatniemu elementowi wchodzącemu w skład systemu ścianowego poświęcono dwa następne rozdziały pracy, kompleksowo opisując budowę, działanie i sposoby monitorowania jego pracy.

## 2.1. Sekcja obudowy zmechanizowanej

Kluczowym kryterium wpływającym na konstrukcję sekcji obudowy zmechanizowanej jest zapewnienie odpowiedniej interakcji między sekcją oraz górotworem, uwzględniając specyficzne warunki geologiczno-górniczne panujące w danym wyrobisku ścianowym. Każdy z elementów sekcji pełni odrębną funkcję, co jest kluczowe do realizacji zadań, do których sekcja została przeznaczona [66, 2] (Rys. 6).



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

Do głównych elementów sekcji obudowy zmechanizowanej należą:

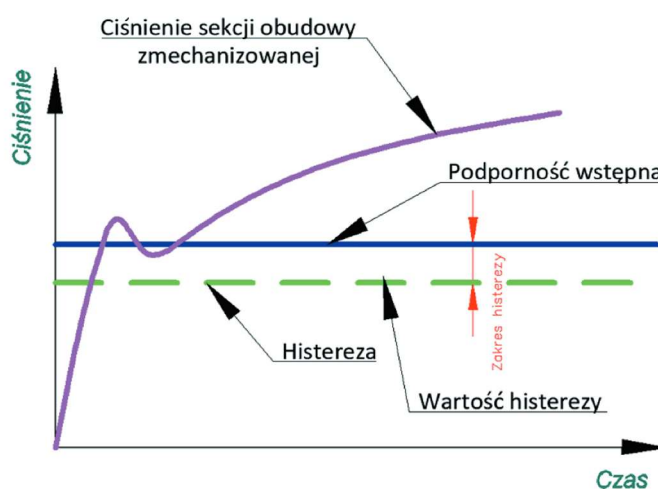
- stropnica - jest górnym elementem sekcji obudowy zmechanizowanej, który bezpośrednio przylega do stropu wyrobiska. Jej zadaniem jest podtrzymywanie stropu i przenoszenie obciążeń na pozostałe elementy sekcji. Stropnica zapewnia również ochronę pracowników i sprzętu znajdującego się pod nią [67, 33, 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. Stojak hydrauliczny 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],

- spąglica - stanowi dolną część sekcji obudowy, która opiera się na podłożu wyrobiska. Jej zadaniem jest stabilizacja całej konstrukcji oraz przenoszenie obciążeń na spąg. Spąglica 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 wydobycia 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 [20, 59, 34, 15].

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 [10]. W praktycznych rozwiązaniach stosuje się również systemy monitorujące wybrane parametry eksploatacyjne, takie jak wartości ciśnienia w stojakach hydraulicznych niezbędne do analizy kondycji stropu.

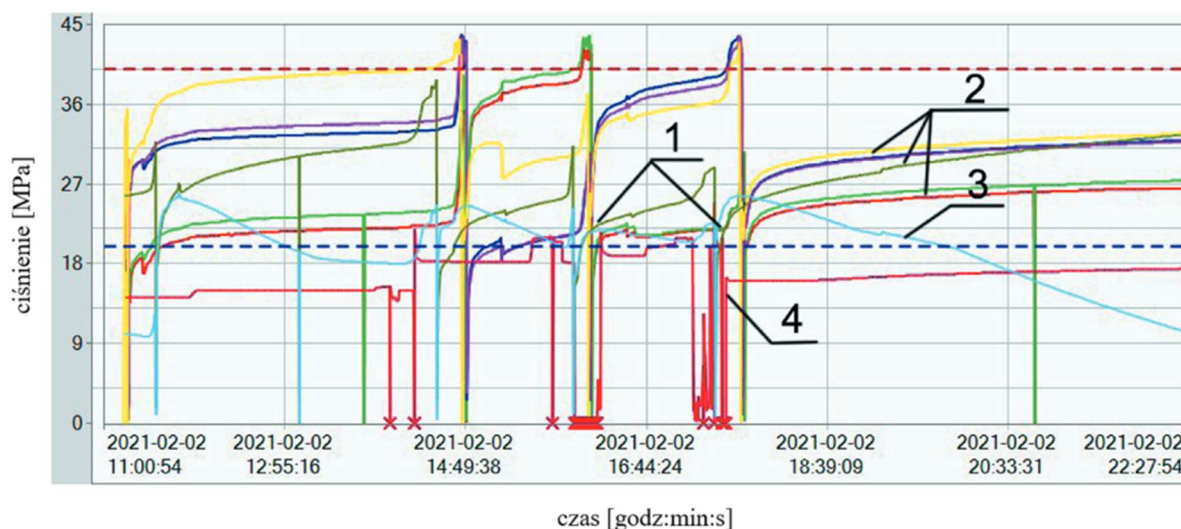
Monitoring ciśnienia w stojakach hydraulicznych pozwala określić wartość podporności wstępnej sekcji. Podporność wstępna definiowana jest jako wartość ciśnienia uzyskiwanego podczas procesu rozpierania obudowy. Opisany parametr wpływa na cały cykl pracy sekcji obudowy zmechanizowanej i efektywną zdolność przenoszenia obciążeń pochodzących od górotworu.



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

Bardzo ważnym czynnikiem eksploatacyjnym jest 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 [38, 28] skutkujące niestabilnością, przyspieszeniem zużycia elementów eksploatacyjnych oraz wynikowym zmniejszeniem bezpieczeństwa i pewności pracy.

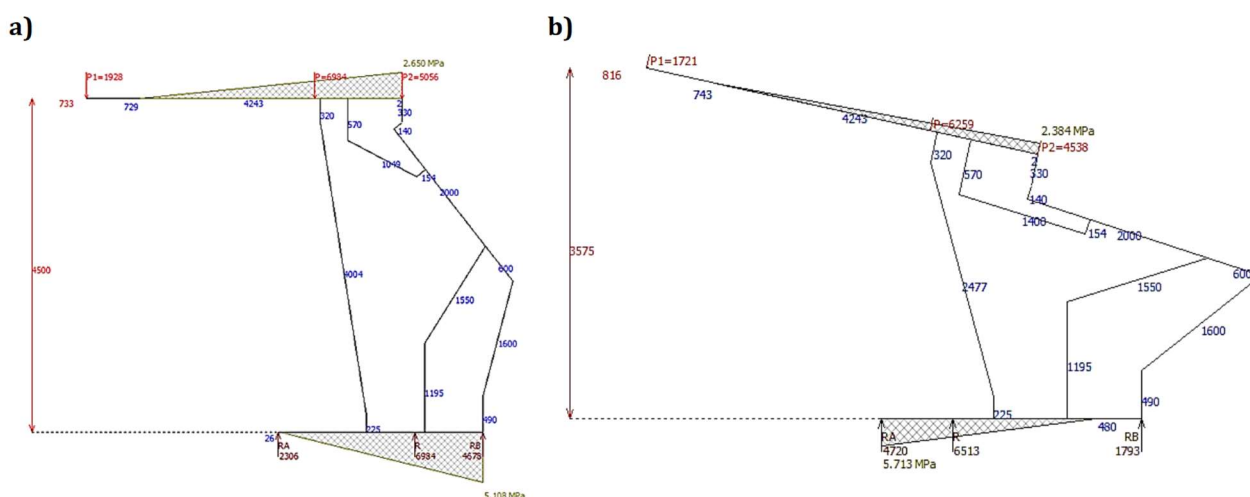


Rys. 8. Charakterystyki czasowe pomiarów do celów diagnostyki ciśnienia oleju w stojakach hydraulicznych sekcji obudowy zmechanizowanej [38] (1 - cykl produkcji i następująca po nim zabudowa sekcji 2 - prawidłowe przyrosty wartości ciśnienia w stojakach następujące po zabudowie sekcji w ścianie, 3 - wykres wartości ciśnienia w stojaku świadczący o awarii jednego ze stojaków sekcji 4 - wykres wartości ciśnienia w stojaku)

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 [38]. 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) [38]. 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.

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 zatapanie 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. 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 wydobywaniu węgla. Strefa spękań stanowi obszar potencjalnego opadu skał, co negatywnie wpływa na współpracę obudowy z górotworem [28, 4, 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 wystąpieniu [28].

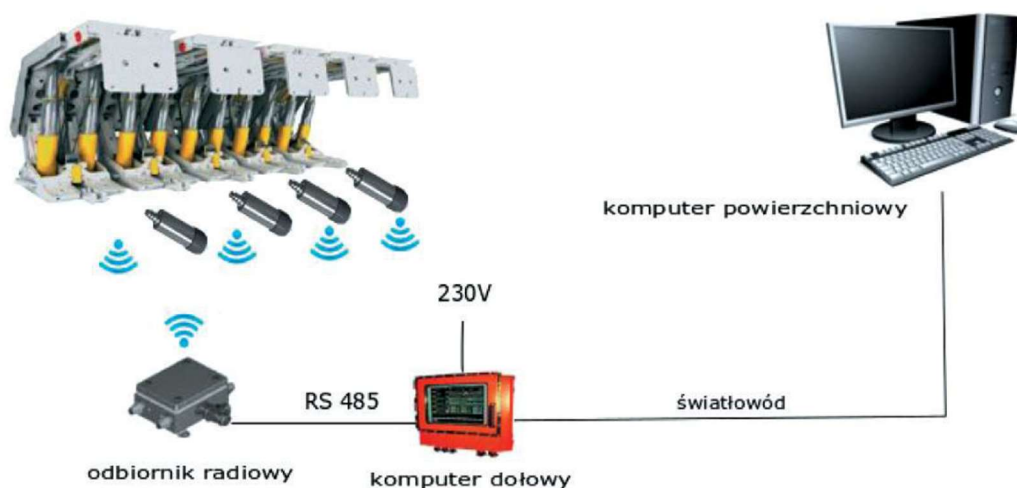
Podsumowując, sekcje obudowy zmechanizowanej pełnią funkcje zabezpieczenia sprzętu i załogi podczas procesu eksploatacji ściany wydobywczej. Precyzyjne położenie sekcji w wyrobisku jest kluczowe ze względu na zapewnienie ciągłości procesu wydobywania i jego bezpieczeństwa.



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 (tąpania, zawały i obwały skał).

## 2.2. Systemy monitorowania podporności i geometrii obudowy zmechanizowanej – przegląd

Na rynku występuje obecnie kilka typów rozwiązań systemów do monitoringu sekcji obudów zmechanizowanych. Jednym z nich jest bezprzewodowy system monitorowania ciśnienia w stojakach hydraulicznych [55, 8, 64, 28, 29] autorstwa firmy DOH Sp. z o.o. System realizuje monitorowanie ciśnienia w stojakach hydraulicznych sekcji obudowy zmechanizowanej, poprzez ciągły pomiar i analizę wartości ciśnień w podtłokowych częściach siłowników stojaków.



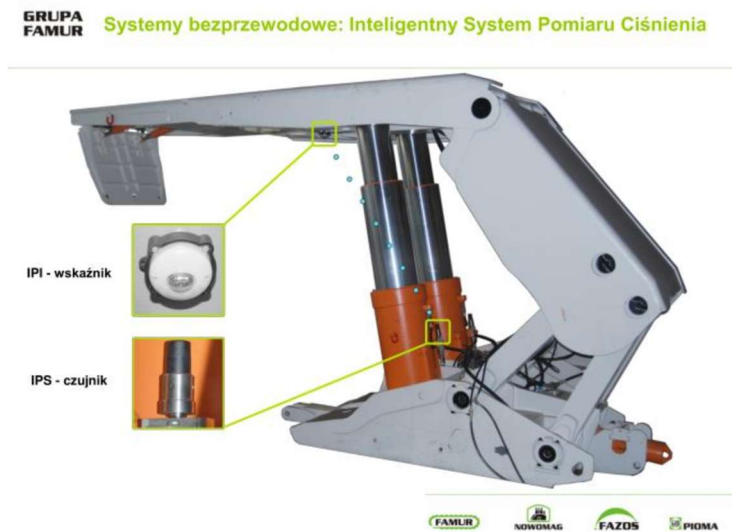
Rys. 10. Schemat systemu bezprzewodowego pomiaru ciśnienia firmy DOH [8]

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 [8]. 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 [64] (Rys. 10).



Rys. 11. Widok czujnika ciśnienia firmy DOH [68]

Kolejnym z systemów realizujących monitoring ciśnienia w stojakach hydraulicznych jest system RSPC firmy Famur S.A. [83]. Konfigurację systemu RSPC firmy Famur S.A. przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Widok systemu pomiaru ciśnienia RSPC firmy Famur S.A. [83]

System RSPC Famur (Rys. 12 i Rys. 13) zbudowany jest podobnie jak rozwiązanie firmy DOH, jednak oprócz bezprzewodowego czujnika IPS posiada dodatkowy wskaźnik IPI zabudowany na sekcji. Za pomocą odpowiedniego znacznika optycznego wskaźnik IPI informuje o stanie ciśnienia i przekroczeniu progów granicznych [82].

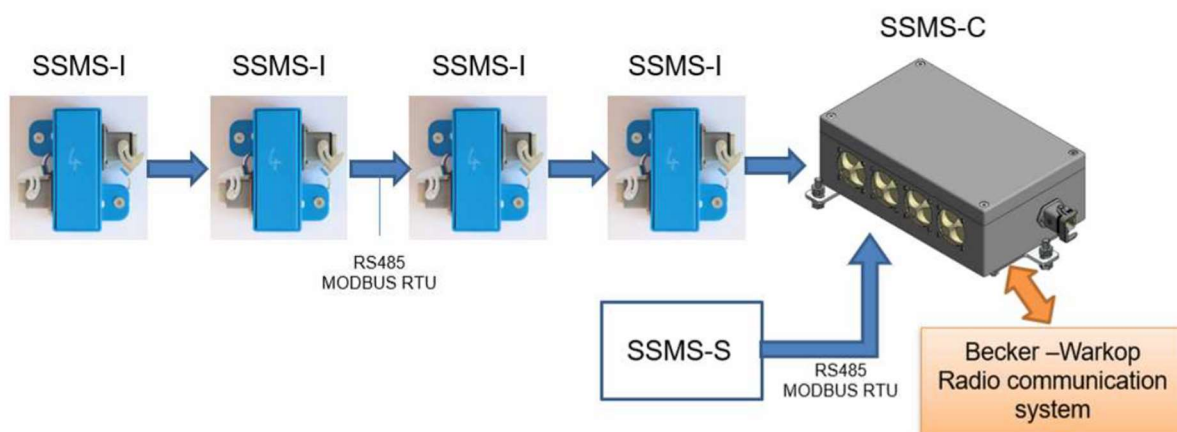


Rys. 13. Widok czujnika ciśnienia IPS oraz wskaźnika IPI firmy Famur [82]

Przedstawione systemy pomiaru ciśnienia przeznaczone są do pracy w zabudowie na sekcjach obudowy zmechanizowanej, a każdy z elementów systemu posiada certyfikat spełnienia wymogów dyrektywy ATEX. Opisane rozwiązania są w stanie rejestrować wartości ciśnienia statycznego w stojakach hydraulicznych, natomiast pomiar dynamicznych zmian wartości ciśnienia jest ograniczony ze względu na zasilanie bateryjne.

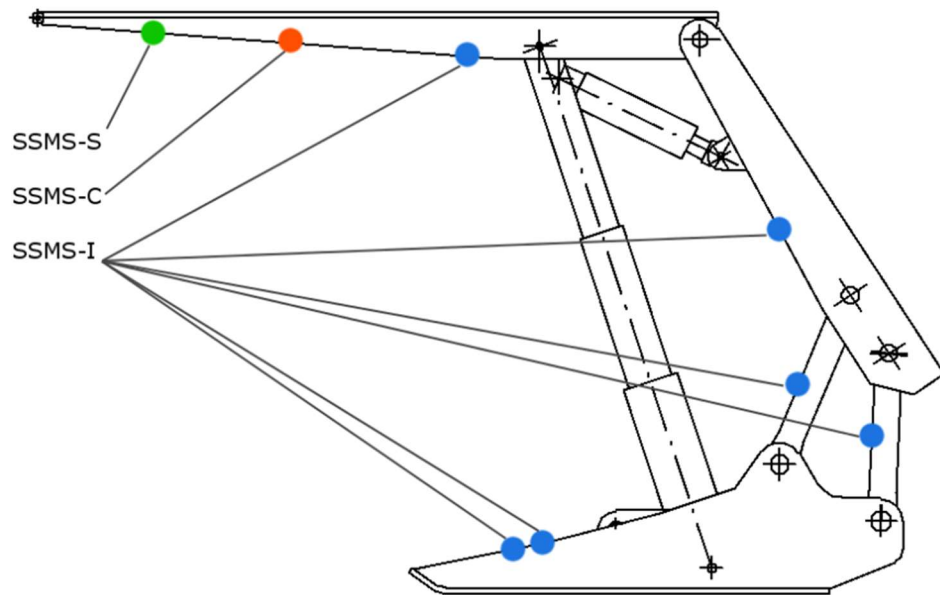
Istnieją również systemy przewodowe zbudowane jedynie na potrzeby badań, które nie spełniają wymogów dyrektywy ATEX, jednak są w stanie rejestrować dane o ciśnieniu z częstotliwością zapisu wynoszącą 1 Hz (umożliwiając jednocześnie zapis zmian ciśnienia w obwodach hydraulicznych). Dynamiczna rejestracja pomiaru, przy częstotliwości próbkowania w zakresie 1-5 kHz jest automatycznie aktywowana na okres 5-25 sekund [59]. W rzeczywistych warunkach pracy montaż przewodowych systemów pomiaru ciśnienia pomiędzy sekcjami obudowy zmechanizowanej doprowadziłby do ich szybkiego uszkodzenia w procesie eksploatacji, w związku z czym w procesie eksploatacyjnym nie spotyka się tego typu rozwiązań.

System przewodowy do pomiaru geometrii sekcji obudowy zmechanizowanej (pracujący w obrębie jednej sekcji), spełniający wymagania dyrektywy ATEX, został zbudowany w ramach realizacji projektu finansowanego z europejskiego funduszu węgla i stali. Wynikiem projektu o akronimie PRASS III (ang. Productivity and Safety of Shield Support) jest prototyp systemu pomiaru geometrii sekcji obudowy zmechanizowanej SSMS (ang. Shield Support Monitoring System; Rys. 14 i Rys. 15) [28, 29].



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]

Z jednostki centralnej SSMS-C za pomocą modułu radiowego dane przekazywane są do sieci pomiarowej czujników ciśnienia firmy Becker-Warkop. System został zamontowany i przetestowany w trzech polskich kopalniach. Z powodu częstych awarii okablowania i błędów transmisji radiowej występowały zakłócenia lub przerwy w akwizycji danych pomiarowych podczas testów systemu. Przypadek pokazuje, że konieczne jest wyeliminowanie połączeń kablowych, tak aby wszystkie elementy systemu przesyłały dane pomiarowe bezprzewodowo. Stwierdzono również, że obligatoryjnym rozwiązaniem jest opracowanie algorytmu zarządzania transmisją danych w sieci o topologii Mesh [28].

Podsumowując w systemach monitorujących geometrię oraz wartości ciśnienia w stojakach hydraulicznych konieczne jest opracowanie bezprzewodowych interfejsów czujników do monitoringu. Wiąże się to z rozbudową bezprzewodowej sieci sensorów, co z kolei wymaga opracowania algorytmów zarządzających transmisją danych w tak rozbudowanych sieciach sensorycznych. Opracowane algorytmy powinny wpłynąć na zbliżenie wartości parametrów sieci bezprzewodowych do tych pracujących w oparciu o przewodowe przesyłanie danych.

### 2.3. Warunki pracy w podziemiach kopalń węgla kamiennego, a wymagania stawiane urządzeniom

Urządzenia pracujące w monitoringu kompleksu ścianowego muszą spełniać szereg wymagań ze względu na warunki środowiskowe towarzyszące procesowi wydobywania węgla kamiennego. Środowisko to charakteryzuje się:

- wysokim poziomem zapylenia - stężenie pyłu (wyznaczane metodą pomiarową pyłomierzami grawimetrycznymi jako wartość średnia) w przodku wyrobiska korytarzowego drążonego

przy użyciu kombajnu chodnikowego wynosi do 100 mg/m<sup>3</sup> [39]. Zazwyczaj jednak stężenie pyłu jest niższe, nie przekraczając wartości 40 mg/m<sup>3</sup>. Jak wskazuje autor publikacji [39], chwilowe stężenie pyłu może być wielokrotnie wyższe od średniej wartości. W ekstremalnych warunkach maksymalne chwilowe stężenie pyłu może osiągać kilkaset mg/m<sup>3</sup>. Przepisy określają, że najwyższe dopuszczalne stężenie (NDS) pyłu na stanowisku pracy w kopalni musi mieścić się w zakresie 1-10 mg/m<sup>3</sup>, w zależności od zawartości wolnej krzemionki. Przy czym podana wartość średnia mierzona jest w ciągu całej zmiany [3, 77],

- wysoką temperaturą - temperatura powietrza w kopalni zależy od wielu czynników, takich jak: temperatura i ciśnienie dostarczanego powietrza, temperatura skał, intensywność przewietrzania, głębokość doprowadzania powietrza szybem, reakcje chemiczne zachodzące w skałach lub wyrobiskach górniczych, inne czynniki związane z pracą ludzi i maszyn oraz robotami strzałowymi. Temperatura skał wzrasta wraz z głębokością, na której prowadzone są prace górnicze. Z tego powodu w głębokich kopalniach węgla można spodziewać się wysokich temperatur, zwłaszcza w przodkach drążonych wyrobisk. Często konieczne jest obniżenie temperatury poprzez zwiększenie ilości i prędkości przepływu powietrza, stosowanie specjalnych urządzeń chłodzących lub izolacji cieplnej głównych dróg wentylacyjnych. Zgodnie z przepisami temperatura w miejscu pracy nie powinna przekraczać 28°C. Przy temperaturze 28-33°C czas pracy powinien być skrócony do 6 godz., natomiast powyżej 33°C można zatrudniać ludzi tylko w przypadku akcji ratowniczej [77, 20, 78],
- wybuchowym stężeniem metanu - podczas eksploatacji złóż węgla kamiennego może nastąpić niekontrolowane uwolnienie metanu. Metan jest gazem wybuchowym, a zdolność do wybuchu zależy od jego stężenia i poziomu tlenu w powietrzu. Przy czym stężenie metanu w granicach od 5-15% stanowi bezpośrednie zagrożenie wybuchem. Zapłon i wybuch metanu wymagają czynnika inicjującego, którym może być pożar endogeniczny, roboty strzałowe, iskry (powstałe w wyniku tarcia przemieszczających się brył skał bądź podczas procesu urabiania) lub nieodpowiednio zabezpieczone urządzenie elektryczne pracujące w kopalni [7].

W kopalniach węgla kamiennego określone zostały wymagania w zakresie budowy stosowanych urządzeń w zależności od tego, w jakiej strefie zagrożenia wybuchem się znajdują. Wymogi te określa dyrektywa ATEX 2014/34/UE oraz normy z nią zharmonizowane [79].

Przy projektowaniu urządzeń należy spełnić szereg wymagań stawianych urządzeniom pracującym w kopalniach przez wspomniane normy. Urządzenie powinno posiadać odpowiedni stopień zabezpieczenia przed wnikaniem pyłu i wody IP (ang. Ingress Protection; Tab. 1).

Tab. 1. Stopień IP wyrażany za pomocą dwóch cyfr IP XY [40], gdzie: X – ochrona przed ciałami stałymi, Y – ochrona przed wilgocią i wodą

<b>X</b>	<b>opis</b>	<b>Y</b>	<b>opis</b>
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 [79]. 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],
- Grupy II - dotyczącej urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do stosowania w miejscach innych niż zakłady górnicze, gdzie istnieje ryzyko wybuchu [41].

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

- Kategoria M1 - obejmuje urządzenia zaprojektowane oraz w razie potrzeby, wyposażone w specjalne dodatkowe zabezpieczenia przeciwybuchowe, 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]:
  - 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]:
  - 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 (Tab. 2).

Tab. 2. Rodzaje zabezpieczeń stosowane w urządzeniach pracujących w grupie I [16]

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

Projektując urządzenia, które będą pracować w warunkach środowiskowych podziemi kopalń węgla kamiennego należy brać pod uwagę i stosować wszystkie wymagania stawiane przez dyrektywę ATEX i normy zharmonizowane. Sieci sensoryczne monitorujące parametry pracy sekcji obudowy zmechanizowanej pracują w środowisku zagrożenia wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego. Konieczne jest więc zaprojektowanie poszczególnych węzłów sieci sensorycznej zgodnie z wymaganiami dyrektywy ATEX na podstawie doboru odpowiedniego poziomu zabezpieczeń określonego w normach zharmonizowanych z dyrektywą. Poszczególne sensory powinny zostać zaprojektowane w ten sposób, aby przy dobraniu wymaganych zabezpieczeń zachowane były parametry funkcjonalne urządzeń.

### 3. Algorytmy trasowania sieci sensorycznych

Czujniki używane w monitoringu kompleksu ścianowego są wyposażone w bezprzewodowe moduły transmisji danych pomiarowych. Liczba czujników bezprzewodowych monitorujących stan maszyn i urządzeń górniczym ciągle rośnie, a w tak rozbudowanych sieciach konieczna jest odpowiednia organizacja transmisji danych w celu zapewnienia niezawodności działania, elastycznej konfiguracji oraz bezpieczeństwa eksploatacyjnego. Szczególnie istotne jest zapewnienie niezawodności działania sieci sensorycznych pracujących w warunkach zagrożenia wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego. Aby zapewnić mobilność oraz łatwą implementację w sieciach czujników zaimplementowane są zaawansowane algorytmy transmisji, dzięki którym możliwe jest sprawne zarządzanie przepływem danych w rozbudowanej infrastrukturze sieciowej [61, 2, 31].

#### 3.1. Podstawowe zagadnienia w zakresie algorytmów trasowania sieci sensorycznych

Algorytmy trasowania stosowane w sieciach sensorycznych są kluczowym obszarem badań z uwagi na unikalne ograniczenia i wymagania odnośnie do samych struktur sieciowych. Sieci te składają się z wielu małych, niskoenergetycznych węzłów sensorowych, które współpracują w celu monitorowania środowiska i wykonywania innych zadań. Węzły są ograniczone pod względem energii, pamięci oraz mocy obliczeniowej, co stawia znaczące wyzwania w projektowaniu efektywnych protokołów trasowania [84, 49, 36].

Algorytmy trasowania w sieciach sensorycznych używane są w celu zapewnienia optymalnego przebiegu dostarczenia wysłanego pakietu danych od nadawcy do odbiorcy, pod względem kryteriów w postaci [1]:

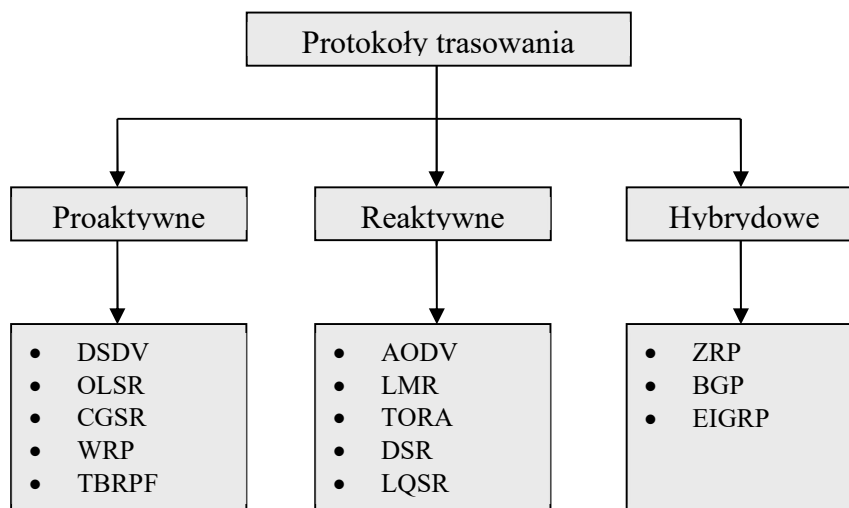
- trasy - z uwzględnieniem przyjętych miar trasowania,
- prostoty funkcjonowania algorytmów,
- odporności na uszkodzenia i stabilności działania,
- szybkości konwersji,
- elastyczności trasowania,
- innych kryteriów zależnych od zastosowania oraz dostępnych funkcjonalności modułów sprzętowych.

Algorytmy trasowania stosowane w sieciach sensorycznych dzielą się na płaskie oraz hierarchiczne.

W płaskich protokołach trasowania wszystkie węzły traktowane są w równorzędny sposób, co oznacza brak hierarchicznej organizacji. Przykładem takiego protokołu jest zorientowana na dane ukierunkowana dyfuzja (ang. Directed Diffusion), która polega na nazywaniu danych przez pary



atrybut-wartość. Węzły rozprzestrzeniają zainteresowanie danymi, a ścieżki są wzmacniane w celu ustanowienia efektywnego trasowania [11]. Inny przykład to algorytm typu Rumor Routing, będący wariantem ukierunkowanej dyfuzji, zaprojektowany do obsługi przypadków, w których trasowanie geograficzne jest niepraktyczne. Algorytm tworzy trasy do zdarzeń (gdy czujnik w sieci wykryje jakieś zdarzenie (np. zmianę temperatury, ruch), tworzy komunikat o zdarzeniu. Ten komunikat to tzw. „plotka” (rumor)). Komunikaty wysyłane są do losowo wybranych węzłów (redukuje to nadmiar danych w sieci). Gdy inny węzeł (czujnik) chce uzyskać informacje o tym zdarzeniu, generuje zapytanie. Zapytanie to, podobnie jak plotka, rozsyłane jest losowo do sąsiednich węzłów. Jeśli zapytanie natrafi na węzeł, który jest na „ścieżce plotki” prowadzącej do zdarzenia, węzeł ten przekazuje zapytanie wzdłuż tej ścieżki do źródła zdarzenia. [6].



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

Dodatkowo płaskie algorytmy trasowania można podzielić na trzy oddzielne grupy (Rys. 16. ):

- algorytmy proaktywne - zapamiętują trasy pomiędzy poszczególnymi węzłami sieci w tzw. tabelach rutingowych. Trasy te są cyklicznie odświeżane, aby zapamiętane dane były zgodne ze stanem obecnym (tzw. utrzymywanie ścieżek następuje niezależnie czy odbywa się ruch do poszczególnych węzłów sieci). Można wyróżnić następujące typy algorytmów proaktywnych: protokół trasowania wektora odległości z sekwencją miejsc docelowych o dużej dynamice DSDV (ang. Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance Vector Routing Protocol), zoptymalizowany algorytm trasowania stanu łącza OLSR (ang. Optimized Link State Routing Protocol), rozproszony algorytm wyboru węzła głównego klastra CGSR (ang. Cluster Gateway Switch Routing Protocol), algorytm bezprzewodowego trasowania z optymalizacją aktualizacji WRP (ang. Wireless Routing Protocol), algorytm

rozpowszechniania topologii oparty na przesyłaniu wstecznych ścieżek TBRPF (ang. Topology Dissemination based on Reverse-Path Forwarding routing protocol), algorytm kierunkowego trasowania z gwarancją jakości usług QDRP (Quality of Service-Directional Routing),

- algorytmy reaktywne - wyszukują trasę, tylko w momencie, gdy potrzebne jest wysłanie pakietu danych. Wśród zbioru algorytmów reaktywnych można wyodrębnić: algorytm trasowania na żądanie z wektorami odległości w sieciach Ad-hoc AODV (ang. Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing Protocol), algorytm wielościeżkowego trasowania oparty na etykietach LMR (ang. Label-based Multipath Routing), algorytm trasowania oparty o porządek czasowy TORA (ang. Temporally-Ordered Routing Algorithm Routing Protocol), algorytm trasowania źródłowego z dynamicznym ustalaniem tras DSR (ang. Dynamic Source Routing Protocol), algorytm trasowania źródłowego oparty na jakości połączeń LQSR (ang. Link Quality Source Routing),
- algorytmy hybrydowe - sieć dzielona jest na mniejsze części, a zapamiętywane są przez węzły jedynie trasy wydzielonych części sieci. Algorytmy hybrydowe można podzielić na: algorytm trasowania strefowego ZRP (ang. Zone Routing Protocol), algorytm trasowania brzegowego BGP (ang. Border Gateway Protocol), Rozszerzony algorytm trasowania wewnątrz systemu autonomicznego EIGRP (ang. Enhanced Interior Gateway Routing Protocol).

Hierarchiczne protokoły trasowania, takie jak LEACH (ang. Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), wykorzystują podejście warstwowe w celu poprawy skalowalności i efektywności energetycznej. LEACH polega na dynamicznym klastrowaniu węzłów w którym głowy klastrow agregują i kompresują dane przed ich wysłaniem do stacji bazowej. Takie działanie wpływa na minimalizację zużycia energii [21]. Podobnie, protokoły takie jak PEGASIS (ang. Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) tworzą łańcuchy węzłów sensorowych, gdzie każdy węzeł komunikuje się tylko z najbliższym sąsiadem (co dodatkowo zwiększa oszczędność energii) [46].

Wśród algorytmów płaskich oraz hierarchicznych można spotkać protokoły trasowania oparte na lokalizacji, które wykorzystują fizyczną lokalizację węzłów do podejmowania decyzji o trasowaniu. Algorytmy GAF (ang. Geographic Adaptive Fidelity) i GEAR (ang. Geographic and Energy Aware Routing) stanowią przykłady, w których węzły korzystają z informacji o lokalizacji w celu tworzenia energooszczędnej trasy. Podstawową zasadą działania GAF jest maksymalizacja zużycia energii poprzez wyłączenie zbędnych węzłów w określonych obszarach siatki. Natomiast GEAR wykorzystuje informacje o energii i geografii do efektywnego trasowania pakietów danych [72, 73].

Protokoły trasowania wielościżkowego, takie jak AOMDV (ang. Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector) i SMR (ang. Split Multipath Routing), ustanawiają wiele ścieżek między węzłami źródłowymi oraz docelowymi w celu zwiększenia niezawodności i równoważenia obciążenia. Protokoły te mogą skutecznie rozdzielać ruch sieciowy, zmniejszać zatory i zwiększać odporność na awarie węzłów lub łączy, zapewniając przy tym efektywne wyznaczenie alternatywnych ścieżek [45].

Kolejna metoda polega na organizowaniu węzłów w klastry, a głowica klastra odpowiada za komunikację ze stacją bazową. Protokoły takie jak TEEN (ang. Threshold-sensitive Energy Efficient Sensor Network protocol) i APTEEN (ang. Adaptive Periodic Threshold-Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol) są zaprojektowane do obsługi różnych typów dostarczanych danych (krytyczne czasowo i okresowe) poprzez zastosowanie hybrydowego podejścia do klastrowania i transmisji [47, 48].

Ze względu na ograniczenia energetyczne sieci sensorycznych, wiele protokołów trasowania koncentruje się na zagadnieniach optymalizacji efektywności energetycznej. Na przykład trasowanie uwzględniające energię słoneczną adaptuje decyzje o przebiegu trasowania węzłów zasilanych energią słoneczną na podstawie wskaźnika odnawiania energii, przedłużając tym samym czas działania sieci [73].

Innym podejściem jest zastosowanie algorytmów metaheurystycznych, które czerpią inspirację z procesów i zachowań występujących w naturze [17, 24, 35]. W tym przypadku wyróżniono następujące algorytmy:

- optymalizacja kolonią mrówek ACO (ang. Ant Colony Optimization) - algorytm został opracowany przez Marco Dorigo. Powstał na podstawie obserwacji zachowania mrówek, a dokładnie sposobu docierania do pożywienia. Pojedyncza mrówka (tj. zwiadowca) porusza się w sposób losowy, a jej celem jest dotarcie do pożywienia (tzn. rozwiązanie problemu). Podczas poszukiwania rozwiązania problemu, każdy zwiadowca zbiera informacje o charakterystyce problemu oraz własnych osiągnięciach. Mrówki przekazują informacje pomiędzy sobą dzięki mechanizmowi stygmergii (każda z mrówek zostawia informacje na podłożu w postaci feromonu). Pozostałe mrówki wykrywają znacznik i podążają drogą z największą ilością feromonu, przy czym rozwiązaniem problemu jest wyznaczenie najkrótszej ścieżki. Umiejętności każdej mrówki umożliwiają jej znalezienie rozwiązania, ale najczęściej złej jakości. Rozwiązania dobrej jakości są wynikiem współpracy całej kolonii mrówek [24].
- optymalizacja rojem cząstek PSO (ang. Particle Swarm Optimization) - algorytm został opracowany przez Kennedy'ego i Eberharta [6]. Jest to stochastyczny algorytm obliczeniowy obserwujący zachowanie roju (np. stada ptaków, ławicy ryb itp.). Każdy z osobników stada cechuje się określoną prędkością, położeniem, kierunkiem oraz zwrotem. Opisane parametry

są określane na podstawie najlepszych indywidualnych doświadczeń osobników oraz pozostałych sąsiadów [9, 52, 42, 44].

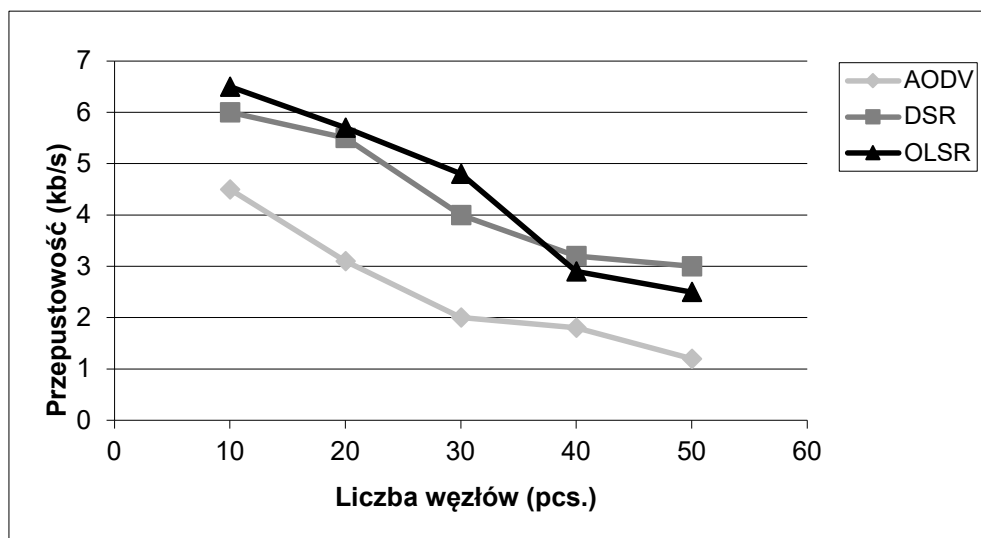
- algorytm pszczeli BA (ang. Bee Algorithm) - algorytm oparty na obserwacji zachowania roju pszczół podczas poszukiwania pożywienia. Najpierw z ula wysyłane są pszczoły, które losowo przeszukują teren. Po powrocie przekazują informacje (kierunek, odległość oraz jakość źródła pokarmu) na temat znalezionej pożywienia kolonii w postaci tańca pszczół. Kolonia na podstawie otrzymanych informacji decyduje o liczbie wysyłanych robotnic (decyduje jakość pożywienia oraz ilość energii jaka trzeba zużyć, aby zdobyć pożywienie). Robotnice podczas zbierania pokarmu odświeżają informację na temat zasobności źródła pokarmu i przekazują je po powrocie do ula. Informacje te są wykorzystywane przez kolonie do podejmowania dalszych decyzji [9].

### 3.2. Testy symulacyjne algorytmów trasowania - przegląd wyników badań

W rozdziale przedstawiono analizę literaturową, w której weryfikowano wyniki przeprowadzonych symulacji algorytmów trasowania pracujących w oparciu o algorytmy reaktywne, proaktywne oraz algorytmy bazujące w swej strukturze na tzw. inteligencji roju (ang. Swarm Intelligence SI).

W pierwszym etapie przeprowadzono analizę literaturową wyników symulacji działania wybranych algorytmów reaktywnych oraz proaktywnych, w tym AODV, DSR oraz OLSR [43].

W publikacji [43] przedstawiono ocenę wydajności protokołów w różnych warunkach pracy oraz przy zmiennych parametrach. Symulacje przeprowadzono w środowisku OPNET Modeler, a podstawowe parametry obejmowały liczbę węzłów, obszar sieci, czas symulacji oraz prędkość ruchu węzłów. Liczba węzłów sieci w przedziale 10-50, a obszar zajmowany przez sieć wyniósł 0-1000 m.

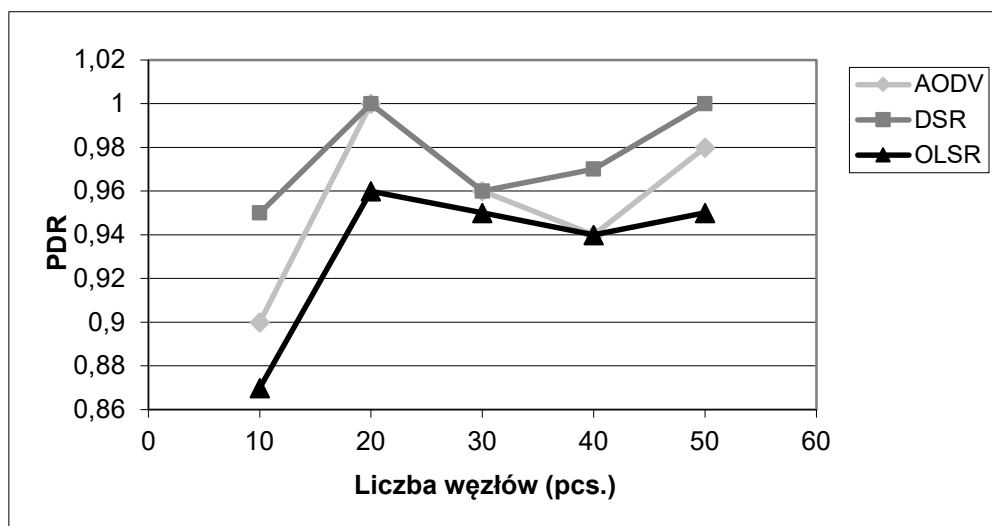


Rys. 17. Zależność przepustowości algorytmów OLSR, DSR oraz AODV od liczby węzłów sieci sensorycznej [43]

Z przeprowadzonych analiz wynika, że wraz ze wzrostem liczby węzłów spada przepustowość transmisji danych (Rys. 17). Najlepsze wyniki w odniesieniu do opisanego parametru symulacji osiągnęła sieć z zaimplementowanym protokołem DSR [43].

Kolejnym parametrem często występującym w badaniach i symulacjach (Rys. 18) jest współczynnik PDR (ang. Packet Delivery Ratio) określający skuteczność dostarczanych danych do adresata [43].

W miarę wzrostu liczby węzłów sieci (Rys. 18) wszystkie protokoły wykazują spadek wartości wskaźnika PDR, jednak algorytmy DSR i OLSR utrzymują najbardziej stabilny poziom dostarczania pakietów niż AODV [43]. Wnioski płynące z przeprowadzonej analizy wskazują, że protokół OLSR pod względem narzutu, opóźnienia oraz przepustowości wypada lepiej niż pozostałe badane rozwiązania. Jednak w przypadku zwiększenia liczby węzłów sieci parametry wszystkich przedstawionych algorytmów ulegają znacznemu pogorszeniu.

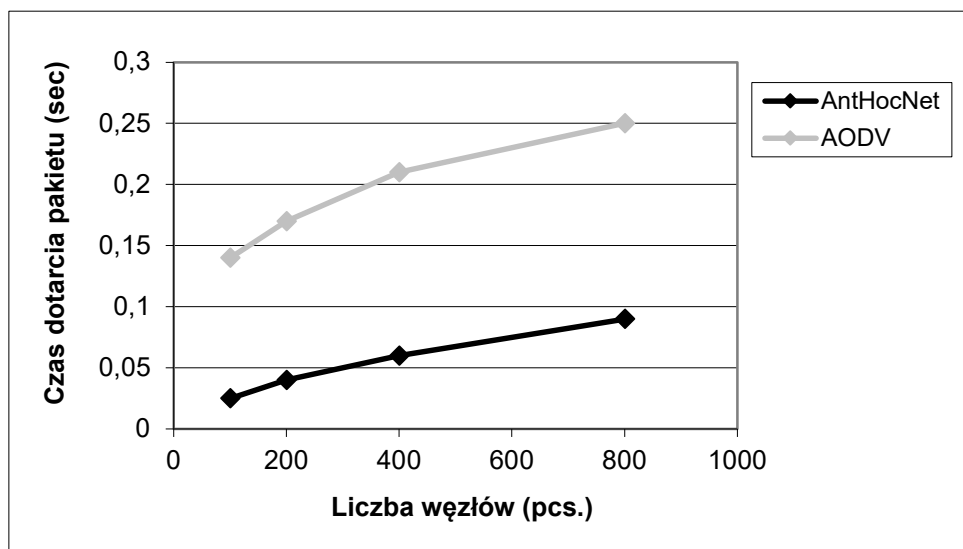


Rys. 18. Protokoły OLSR, DSR oraz AODV. Porównanie współczynnika PDR w zależności od liczby węzłów w sieci [43]

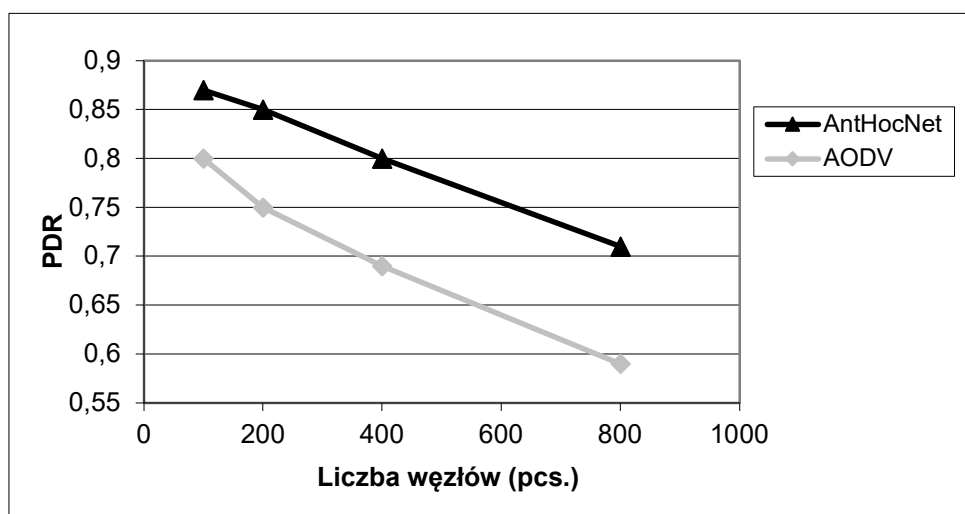
Z wielu analiz [58, 61, 27, 63] wynika również, że algorytmy proaktywne oraz reaktywne (w tym przypadku DSDV oraz AODV) cechują się znacznie lepszym działaniem w sieciach o niezbyt dużej liczbie węzłów (tj. do 20) oraz statycznej topologii. Symulacje przeprowadzone na bazie sieci składającej się z 50 węzłów wskazują, że wraz ze wzrostem prędkości przemieszczania się węzłów spada przepustowość transmisji. Wyniki przedstawionych testów dowodzą równocześnie, że parametry wydajnościowe algorytmów reaktywnych oraz proaktywnych ulegają pogorszeniu wraz ze wzrostem liczby węzłów sieci oraz zwiększeniem prędkości przemieszczania się poszczególnych węzłów. Znacznie lepszymi wartościami parametrów w tym zakresie charakteryzują się algorytmy trasowania oparte na tzw. inteligencji roju SI (ang. Swarm Intelligence).

W dostępnych wynikach symulacji [13] algorytmów pracujących w oparciu o inteligencję roju (Rys. 19) przedstawiono porównanie wydajności protokołu AntHocNet (zbudowanego w oparciu o algorytm mrówkowy ACO) z protokołem AODV. Symulacje przeprowadzono w różnych scenariuszach, zmieniając poziomy mobilności, gęstości węzłów oraz wielkości sieci [13].

a)



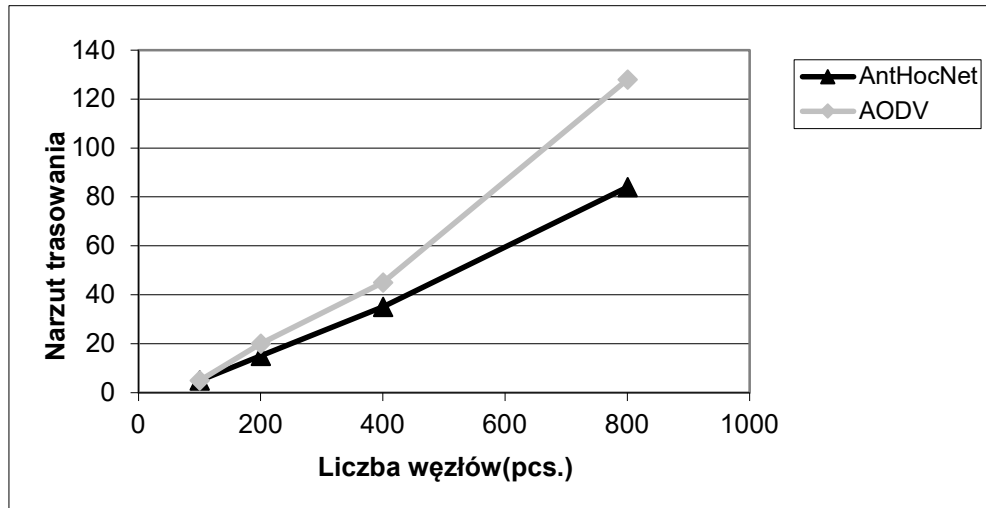
b)



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

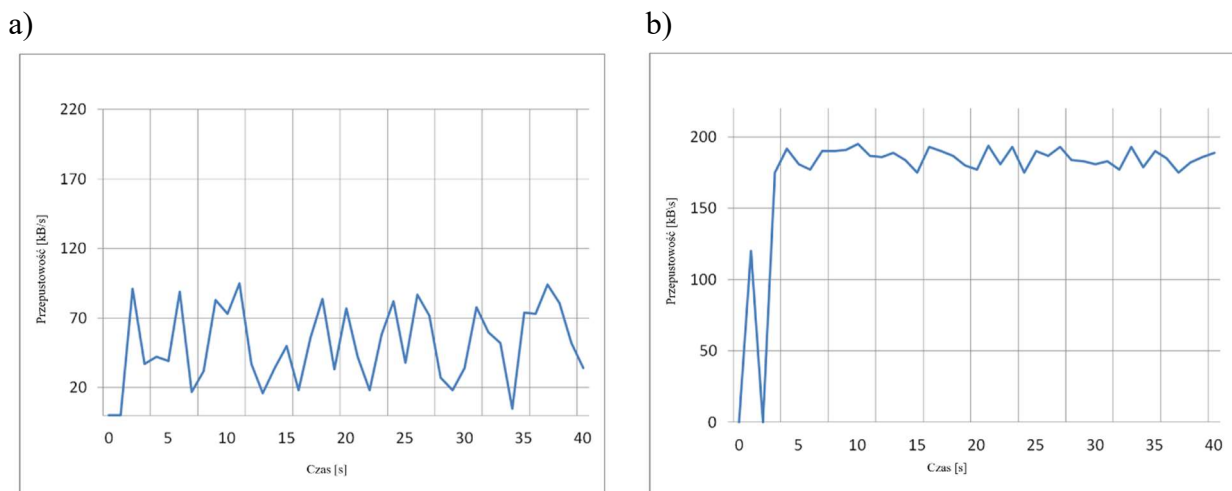
Z przeprowadzanych analiz można wywnioskować, że algorytm ACO charakteryzuje się mniejszymi wartościami czasów dostarczenia pakietów danych do punktu dostępowego (Rys. 19a). Algorytm AntHocNet przewyższa również protokół AODV w zakresie skuteczności dostarczania danych (współczynnik PDR), w całym zakresie badanej liczby węzłów w sieci (Rys. 19b)

Liczba pakietów wymaganych do prawidłowego przeprowadzenia procesu trasowania w przypadku algorytmu AODV wzrasta znacząco przy zwiększeniu liczby węzłów sieciowych (Rys. 20). W związku z tym algorytm AntHocNet charakteryzuje się wyższą skalowalnością, w odniesieniu do liczby węzłów w sieci niż algorytm AODV [13].



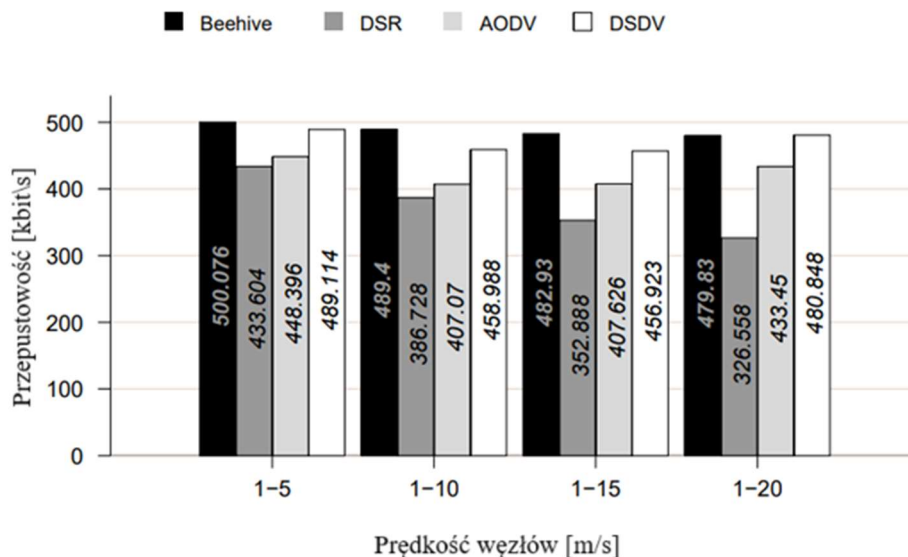
Rys. 20. Protokoły AODV oraz AntHocNet [13]

Na rysunku Rys. 21 przedstawiono porównanie wyników symulacji algorytmów reaktywnego AODV (Rys. 21a) oraz bazującego na optymalizacji rojem cząstek PSO (SSKIR, Rys. 21b) [60]. Z badań wynika, że przepustowość transmisji w sieci o 500 węzłach oraz zastosowaniem algorytmu SSKIR utrzymuje się na poziomie 200kB/s. Symulacja sieci o takich samych parametrach oraz z zastosowaniem algorytmu typu AODV wskazuje na wyraźną niestabilność przepustowości i osiąga wartość oscylującą na poziomie jedynie 95 kB/s [60].



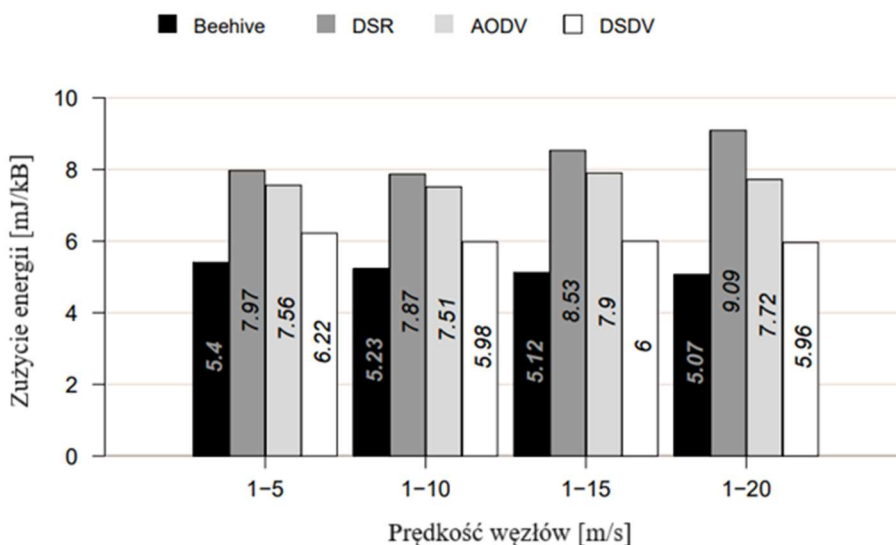
Rys. 21. Protokoły a) AODV oraz b) SSKIR zależność przepustowości sieci w czasie [60]

Kolejną z przedstawionych analiz [71], jest porównanie działania algorytmów trasowania pszczelego BA (o nazwie Beehive) z dwoma algorytmami reaktywnymi DSR, AODV oraz protokołem proaktywnym DSDV. Wyniki przedstawione na rysunku 24 wskazują, że najwyższą przepustowość uzyskał algorytm Beehive [71].



Rys. 22. Porównanie przepustowości algorytmów Beehive, DSR, AODV, DSDV [71]

Protokół Beehive (Rys. 23) charakteryzują się również najmniejszym zużyciem energii w porównaniu z innymi algorytmami trasowania. Wszystkie symulacje były wykonane na bazie sieci posiadającej 50 węzłów, które poruszały się ze zmienną prędkością (w czterech zakresach zmienności) na powierzchni o wymiarach 2400 x 800 m [71].



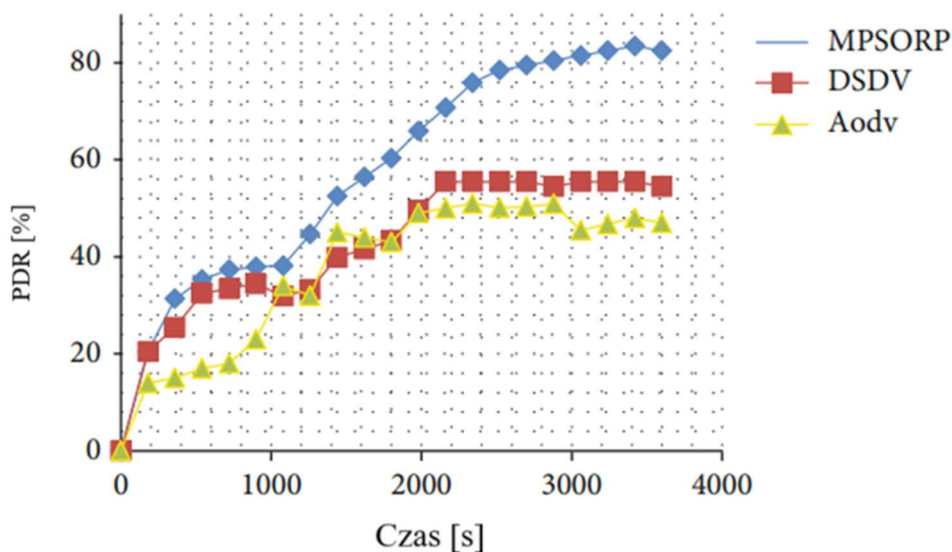
Rys. 23. Zestawienie zużycia energii algorytmów Beehive, DSR, AODV, DSDV [71]

Kolejnym z analizowanych rozwiązań (przedstawionym na rysunkach 26, 27, 28) jest algorytm optymalizacji rojem cząstek PSO [18]. Symulacje zostały przeprowadzone przy użyciu symulatora NS-2 opracowanego w środowisku operacyjnym Linux Ubuntu.

W badaniach porównano wydajność algorytmu MPSORP z protokołami AODV i DSDV na obszarze symulacyjnym o wymiarach 500 x 500 km, przy sieci liczącej 25 węzłów oraz różnych prędkości mobilności (0,006 m/s to 0,47 m/s).

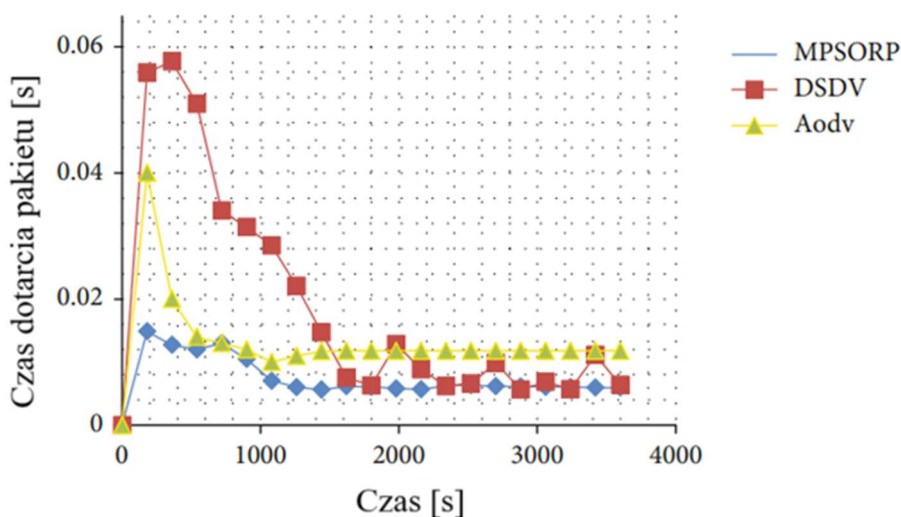


Algorytm MPSORP wykazuje większą wartość wskaźnika dostarczania pakietów (PDR) w porównaniu do AODV i DSDV (Rys. 24) [18].



Rys. 24. Ocena współczynnika PDR (wyznaczona na bazie symulacji) w odniesieniu do algorytmów MPSORP, DSDV, AODV [18]

Wskaźnik określający pewność dostarczenia danych do odbiorcy PDR przy zastosowaniu algorytmu MPSORP osiąga wartość maksymalną około 83%, co przewyższa wskaźniki liczbowe osiąmane przez AODV i DSDV.

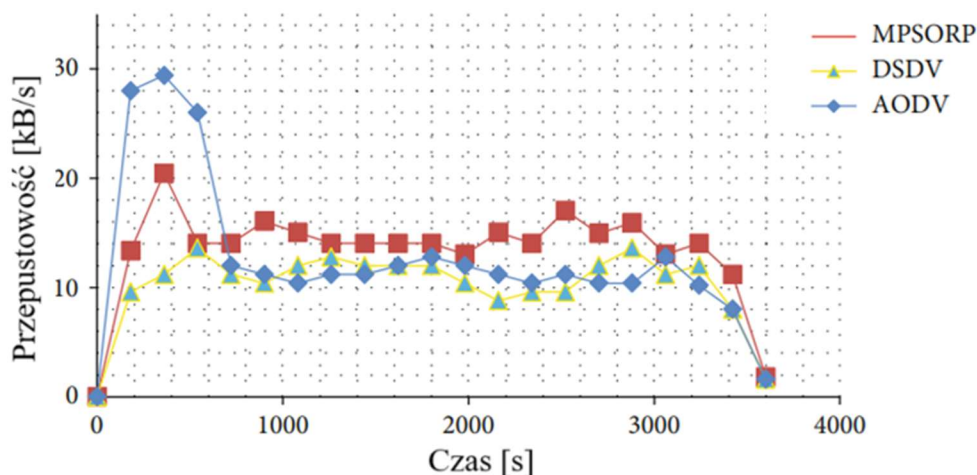


Rys. 25. Czas dotarcia pakietu do miejsca docelowego przy zastosowaniu algorytmów MPSORP, DSDV, AODV [18]

Ponadto algorytm MPSORP osiąga niższe wartości opóźnienia end-to-end w porównaniu do AODV i DSDV (Rys. 25) [18], co czyni go bardziej odpowiednim do zastosowań wrażliwych na

wysoki czas reakcji sieci. Opóźnienie przy zastosowaniu algorytmu MPSORP wynosi około 0,045 sekund, co stanowi znacznie mniejszą wartość w porównaniu z pozostałymi analizowanymi algorytmami.

Kolejno protokół MPSORP wykazuje wyższą przepustowość w porównaniu do algorytmów AODV i DSDV (Rys. 26).



Rys. 26. Przepustowość sieci przy zastosowaniu algorytmów MPSORP, DSDV, AODV [18]

Wyniki analizy symulacji przedstawionych w literaturze wyraźnie pokazują, że protokół MPSORP utrzymuje wyższą przepustowość niezależnie od mobilności węzłów, osiągając najlepsze wyniki przy różnych prędkościach ich ruchu.

### 3.3. Podsumowanie analizy stanu wiedzy

Zastosowanie algorytmów opartych o SI wpływa korzystnie na ustabilizowanie i zwiększenie przepustowości w sieciach sensorycznych w porównaniu do standardowych algorytmów trasowania typu reaktywnego lub proaktywnego.

Przedstawione w przeglądzie wyniki testów zostały uzyskane jednak w wyniku symulacji komputerowych, konieczna jest więc implementacja oraz badanie wybranych typów protokołów na bazie dostępnych na rynku rozwiązań sprzętowych. Algorytmy zaimplementowane w rzeczywistych węzłach sieci muszą zostać poddane serii testów weryfikujących przedstawione wyniki symulacji.

Dodatkowo założona w pracy implementacja przedstawionych algorytmów do węzłów sieci sensorycznych pracujących w strefach zagrożonych wybuchem, wiąże się również z koniecznością spełnienia kilku dodatkowych wymagań obejmujących konstrukcję poszczególnych węzłów. Sprzętowa realizacja pojedynczego węzła sieci musi spełniać wymagania dyrektywy ATEX w szczególności założenie ograniczenia wartości mocy wypromieniowywanej z anteny nadawczo/odbiorczej do określonych przez dyrektywę wartości dopuszczalnych oraz wykonanie

układu radiowego w odmianie niskoenergetycznej (węzły posiadające zasilanie bateryjne lub typu energy harvesting).

Badanie stanu wiedzy pozwoliło na sprecyzowanie szczegółowych kryteriów rozważonych w procesie optymalizacji drogi pakietów danych przesyłanych w sieciach sensorycznych (Tab. 3).

Tab. 3. Zestawienie kryteriów doboru najkorzystniejszej drogi wysłanego pakietu danych

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 kryteriów wzięto również pod uwagę założenia wstępne dotyczące rozwiązania opracowywanego w ramach niniejszej pracy doktorskiej, przy czym analizę wykonano w dwóch obszarach:

- algorytmów i sieci - przepustowość, czas dotarcia pakietu do miejsca docelowego, oszczędność energii, pewność dostarczenia danych do miejsca docelowego,
- sprzętu - w trakcie ustalania kryteriów uwzględniono dostępne rozwiązania rynkowe czujników oraz dodatkowych komponentów systemu, które muszą jednocześnie spełniać wymagania w zakresie algorytmów i sieci (wynikające z powyżej wskazanych wymogów) oraz cechować się odpowiednim poziomem niezawodności pracy urządzeń w środowiskach o niekorzystnym wpływie na ich działanie, pewności działania (szczególnie w zakresie energooszczędności zaproponowanego rozwiązania oraz zgodności z wymogami ATEX).

Zdefiniowany zbiór kryteriów jest wystarczający oraz obejmuje wszystkie niezbędne cechy użytkowe wymagane do spełnienia w przypadku eksploatacji proponowanego rozwiązania w warunkach rzeczywistych.

## 4. Opracowanie algorytmu trasowania

Sensory zamontowane na obudowach zmechanizowanych obejmują najczęściej inklinometry, czujniki ciśnienia oleju w stojakach hydraulicznych oraz moduły pomiaru odległości od czoła ściany [28, 70]. Konieczne jest więc opracowanie algorytmu trasowania (do zarządzania transmisją danych w sieci czujników działających na kompleksie zmechanizowanym), w odniesieniu do całego procesu projektowania sieci różnych grup czujników.

Pierwszym aspektem, niezbędnym do uwzględnienia podczas projektowania sieci czujników, jest charakterystyka środowiska, w którym sieć będzie funkcjonować. Instalacja węzłów sieci jako czujników na obudowie zmechanizowanej w kompleksie ścianowym wymaga zapewnienia widoczności radiowej punktu dostępowego. Ze względu na to, że rozmieszczenie czujników nie gwarantuje widoczności radiowej punktu dostępowego przez każdy czujnik, sugerowaną konfiguracją sieci jest topologia siatki. W takim przypadku każdy z sensorów może przekazywać dane do sąsiedniego czujnika. Dane ze wszystkich czujników muszą bezproblemowo docierać do węzła umieszczonego w komputerze ścianowym, który odpowiada za zapis danych w pamięci, wstępne przetwarzanie i przesyłanie na powierzchnię do centrali zarządzającej.

Konstrukcja czujników (węzłów sieci) zainstalowanych na kompleksie ścianowym musi spełniać wymagania dyrektywy ATEX [79], 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 bateryjnego. 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.

#### 4.1. Koncepcja implementacji algorytmów w modelu sieci sensorycznej

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. 3.2) 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,

$\Delta t$  - 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  $F_{dest}$ :

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

gdzie:

$w_1, w_2$  - 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.

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

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

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

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:

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

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:

$\tau$  - ilość feromonu pozostawionego w poszczególnych węzłach,

$\varphi$  - wartość lokalnej funkcji kryterium,

$l$  - liczba sąsiadów węzła  $i$ ,

$\alpha, \beta$  - 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 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 pszczele

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 [85]. Natomiast informacje diagnostyczne z poszczególnych węzłów odbierane były przez aplikację zainstalowaną na komputerze klasy PC (rozdział 5).

#### **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 (opisanym w rozdziale 6.1) 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  $F_{dest}$ :

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

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:

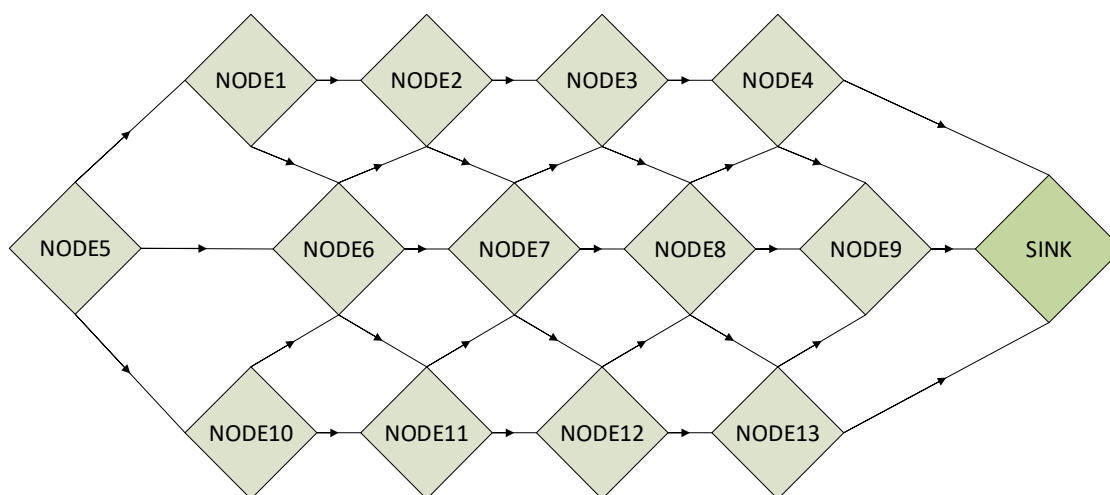
1. W odniesieniu do każdej cząsteczki  $P_i$ :
  - a) Obliczenie funkcji celu bieżącej pozycji cząsteczki  $P_i$  na podstawie odczytanych parametrów sąsiednich węzłów.
  - b) Sprawdzenie warunku - jeśli wartość funkcji celu jest niższa od najlepiej dopasowana wartość znaleziona do tej pory, wykonanie 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 Rys. 27 przedstawiono schemat sieci z węzłami oraz możliwe do wyboru sąsiednie węzły.



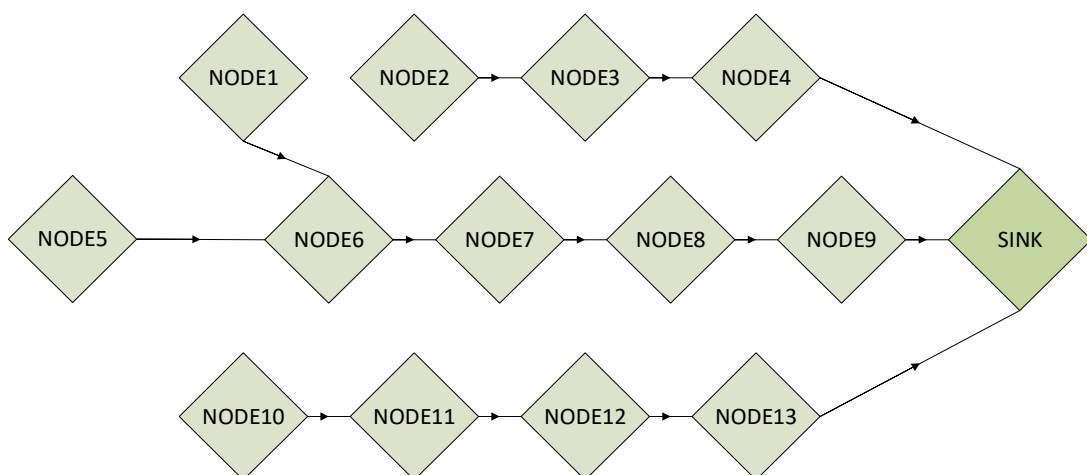
Rys. 27. Widok struktury sieci przed iteracją algorytmu

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

Tab. 4. Struktura węzłów przed iteracją algorytmu

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 określone 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 Rys. 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 (Tab. 5).

Tab. 5. Struktura węzłów badanej sieci sensorycznej po wykonaniu pierwszej iteracji algorytmu

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
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.

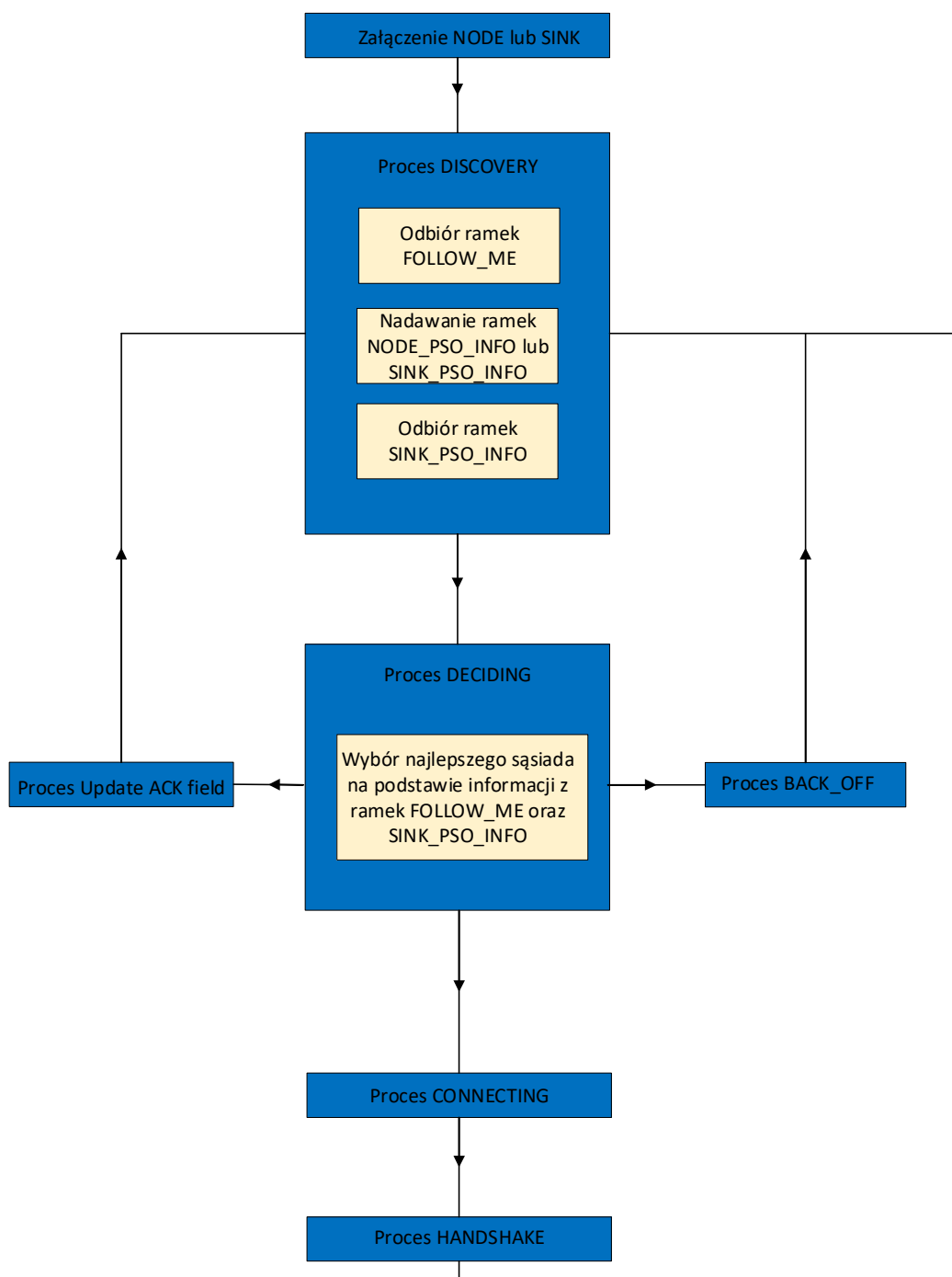
Na obecnym etapie rozwoju algorytmu procedura wyznaczania ścieżki danych w sieci jest uruchamiana w ściśle definiowanych (konfigurowalnych przez użytkownika) odstępach czasu. Główne obliczenia algorytmiczne odbywają się w węźle SINK, który może być zasilany z przewodowej sieci energetycznej (co zapewnia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

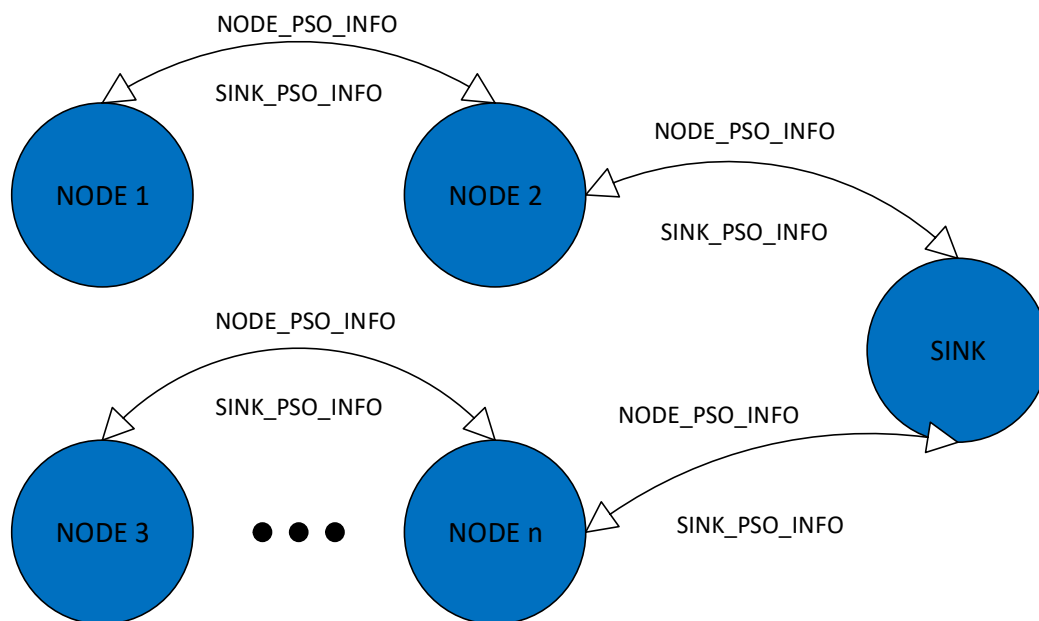
Opracowany algorytm bazuje na stosie programowym FruityMesh [89], w warstwie odpowiedzialnej za wybór sąsiada, z którym realizowane jest połączenie. Do zalet zastosowanego stosu można zaliczyć prostotę i łatwość integracji, skalowalność, energooszczędność, odporność na awarie, centralne zarządzanie i 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

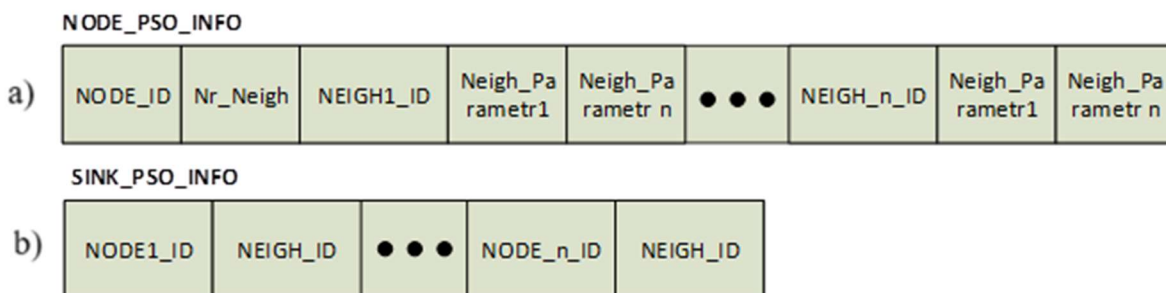
Wyniki obliczeń algorytmu odpowiadającego za wyznaczenie optymalnego rozwiązania globalnego umieszczone zostają w węźle typu SINK. Dane z każdego węzłów typu NODE przesyłane do węzła SINK, zawierające informację o parametrach każdego z jego sąsiadów (ramki o nazwie NODE\_PSO\_INFO), mogą zostać przesyłane 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 wyznaczone 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 (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 odchyżeń, 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.

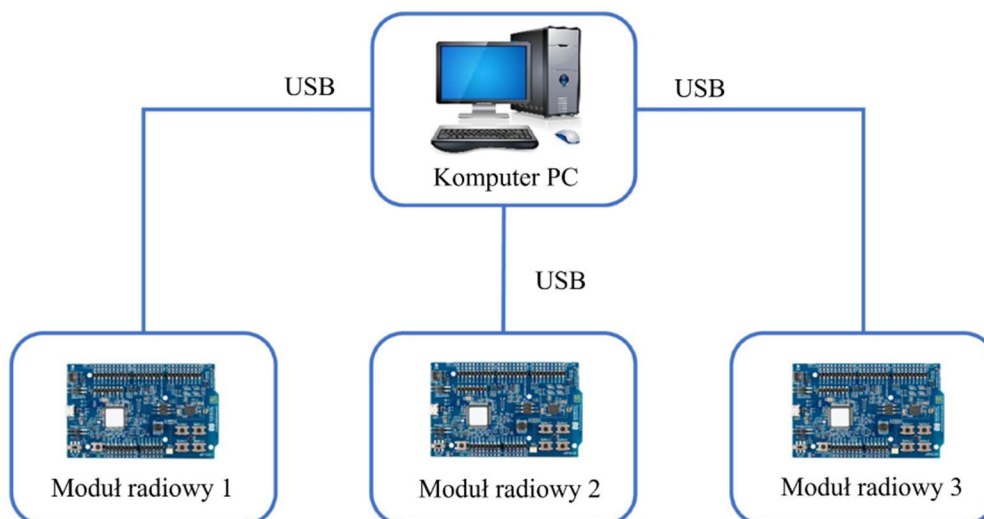
Podczas procesu przesyłania pakietów danych w sieci założono rejestrację wszystkich parametrów pomiarowych zdefiniowanych w ramach założeń. Przy czym procedura badań obejmuje cyklicznie zwiększanie liczby aktywnych węzłów sieci, z jednoczesnym wykonaniem pomiarów, aż do osiągnięcia założonej liczebności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

W celu implementacji opracowanego algorytmu trasowania konieczne było wstępne przygotowanie środowiska walidacyjnego składającego się z trzech węzłów. Uzasadnienie przyjętej struktury konfiguracyjnej sieci oraz liczby węzłów zawarto w rozdziale 4.1.4 (pt. Metoda realizacji badań).

Środowisko zostało skonfigurowane zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 32.

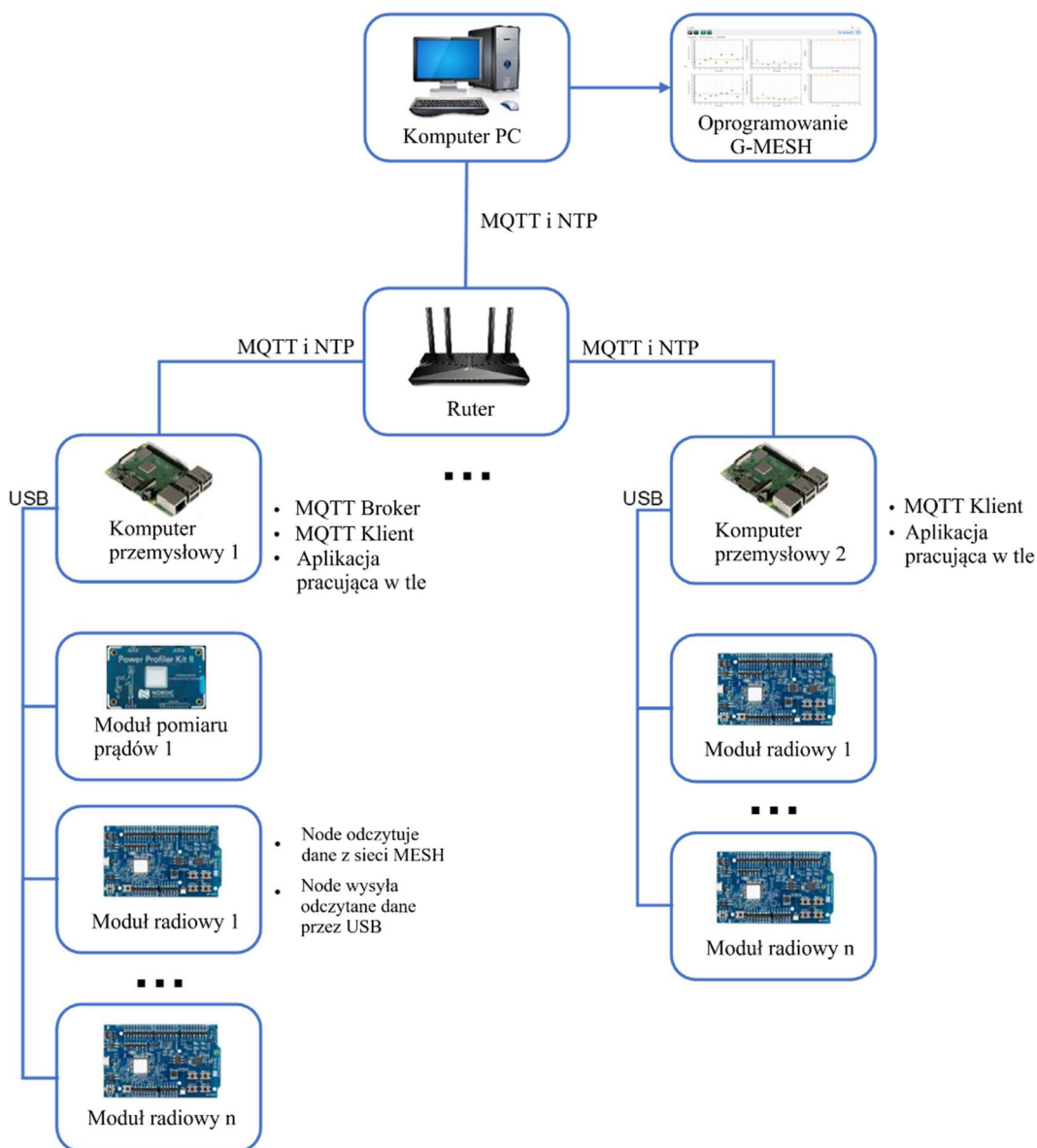


Rys. 32. Schemat blokowy stanowiska badawczego do procesu walidacji - badanie 3 węzłów sieci

Moduły radiowe zostały podłączone do komputera PC za pomocą interfejsu USB, aby umożliwić bezproblemową transmisję danych pomiarowych. Kolejno opracowano dedykowane oprogramowanie umożliwiające:

- przesyłanie danych w sieci sensorycznej za pośrednictwem dobranych poprzednio modułów radiowych,
- odczyt, wizualizację oraz archiwizację danych pomiarowych transmitowanych z poszczególnych modułów radiowych.

W celu walidacji większej liczby węzłów, środowisko zostało rozbudowane o mikrokomputery Raspberry Pi (Rys. 33), które służyły do odczytu danych diagnostycznych z modułów radiowych i przesyłania ich za pomocą protokołu MQTT (ang. Message Queue Telemetry Transport) do oprogramowania zainstalowanego na komputerze klasy PC.



Rys. 33. Schemat stanowiska badawczego do procesu walidacji - badanie 30 węzłów sieci

W celu uzyskania pełnej funkcjonalności projektowanej sieci konieczne było opracowanie sposobu pomiaru zdefiniowanych kryteriów, w tym:

- **czasu dotarcia pakietu do miejsca docelowego** - w celu pomiaru wartości czasu wprowadzono przesłanie informacji do komputera PC o inicjacji tego procesu (tj. w momencie wysyłania pakietu z węzła typu NODE do węzła typu SINK). Następnie, po odebraniu pakietu danych przez węzeł typu SINK, konieczne było wysłanie informacji do komputera PC o odebraniu pakietu. Przesyłane dane musiały być opatrzone odpowiednimi znacznikami czasowymi, a synchronizacja odbywała się na komputerze PC. Podczas pierwszych testów przesyłanie danych kontrolowano za pomocą oprogramowania RealTerm umożliwiającego odbiór i wysyłanie danych do/z portu szeregowego. Oprogramowanie nie umożliwiała jednak umieszczania znaczników czasowych. Dlatego kolejne próby

proawdzono z użyciem oprogramowania CoolTerm, które posiada opisaną funkcjonalność. Różnica wartości pomiędzy odebraniem i wysłaniem pakietu stanowiła czas dotarcia pakietu do miejsca docelowego. W przypadku rozbudowanego środowiska walidacji, odczyt danych synchronizowany był za pomocą protokołu NTP (ang. Network Time Protocol),

- **przepustowości** - w celu wyznaczenia opisanego parametru oprócz czasu, w jakim przesyłane są dane ze źródła do celu, konieczne było rejestrowanie informacji o liczbie przesyłanych danych,
- **pewności dostarczenia danych do miejsca docelowego** - pewność dostarczenia danych do miejsca docelowego określana jest przez tzw. współczynnik PDR, który wyznaczany jest, jako iloraz liczby pakietów odebranych do liczby pakietów wysyłanych:

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

gdzie:

$P_{receive}$  - liczba pakietów odebranych,

$P_{send}$  - liczba pakietów wysyłanych.

W celu wyznaczenia wartości współczynnika PDR konieczne było dodanie informacji o liczbie wysyłanych i odbieranych pakietów danych,

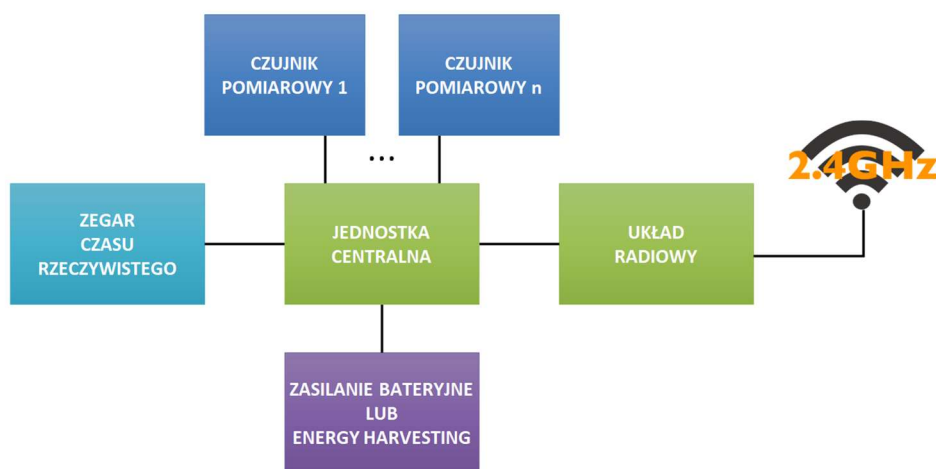
- **zużycia energii pojedynczego węzła sieci** - w celu pomiaru energii zużywanej przez poszczególne węzły sieci zastosowano pomiar natężenia prądu pobieranego przez pojedynczy węzeł sieci. Monitoring był realizowany za pomocą modułu pomiarowego Power Kit Profiler nRF6707, który za pośrednictwem aplikacji NRF Connect realizował pomiary natężenia prądu pojedynczego węzła sieci.

## 5.1. Wybór modułów sprzętowych oraz topologii sieci

W celu implementacji konieczne było określone wytycznych dotyczących konstrukcji pojedynczego węzła sieci sensorycznej. Założono, że pojedynczy węzeł będzie zawierał jednostkę centralną (tj. mikrokontroler o odpowiednio dobranej mocy obliczeniowej) zapewniającą efektywną obsługę stosowanych algorytmów trasowania.

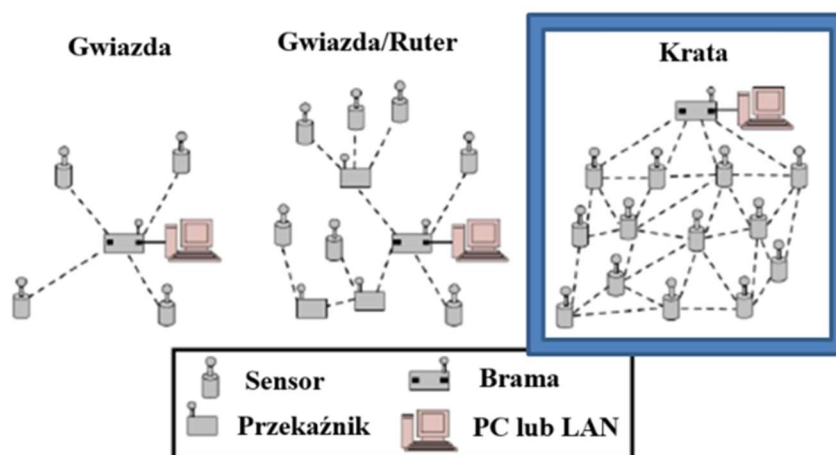
Mikrokontroler został wyposażony w interfejsy zewnętrzne umożliwiające komunikację z czujnikami pomiarowymi, układem radiowym oraz zegarem czasu rzeczywistego. W odniesieniu do wszystkich zastosowanych komponentów przyjęto warunek konieczności zapewnienia niskiego zużycia energii, aby umożliwić zasilanie węzła za pomocą baterii lub technologii energy harvesting. Mikrokontroler powinien mieć również zdolność do pracy w trybie uśpienia, co pozwala na

minimalizację zużycia energii przy jednoczesnym utrzymaniu założonej funkcjonalności. Opracowany projekt koncepcyjny oraz schemat funkcjonalny węzła sieci zgodnie z przyjętymi wytycznymi przedstawiono na rysunku 34.



Rys. 34. Blokowy schemat funkcjonalny pojedynczego węzła sieci sensorycznej

Strukturę połączeń elementów projektowanej sieci sensorycznej zdefiniowano w formie topologii kratowej (Rys. 35). Wybrana konfiguracja umożliwia inicjowanie dowolnej ścieżki przesyłu danych, ponieważ każdy węzeł może pełnić funkcję routera, natomiast urządzenia nie muszą posiadać bezpośredniej widoczności sieciowej z punktem dostępowym. Decyzję o wyborze oparto również na licznych zaletach, w tym na odporności na awarie (uszkodzenie pojedynczego urządzenia nie powoduje przerwania struktury sieci), braku problemów z ruchem sieciowym (każdy węzeł posiada dedykowane łącza punkt-punkt), prostocie diagnostyki i identyfikacji miejsc usterek oraz zapewnieniu wielu ścieżek transmisji danych.



Rys. 35. Wybór topologii sieci czujników - schematyczne ujęcie dostępnych odmian topologii sieci sensorycznych [22]

W ramach badań określono również energochłonność sieci sensorycznej, która zależy od cyklu pracy pojedynczego węzła (obejmującego tryby wybudzenia, realizacji pomiaru, archiwizacji danych, wysyłania pakietu danych oraz uśpienia układu radiowego).

Pomiar był wykonywany w zależności od mierzonych parametrów, co najmniej raz na minutę, lecz nie częściej niż raz na 10 sekund. Założono, że sieć czujników powinna działać przez co najmniej 12 miesięcy w trybie gotowości do pełnej funkcjonalności bez konieczności wymiany zastosowanego układu zasilania.

Zgodnie z przyjętymi kryteriami, wybrano jednostkę centralną oraz układ radiowy. Szczegółowy wykaz modułów radiowych spełniających przyjęte w pracy założenia przedstawiono w tablicy 6.

Biorąc pod uwagę kryterium ceny wybranych do analizy modułów, najbardziej korzystne jest zastosowanie modułu firmy Texas Instruments CC2x. Jednak moduł ten wyposażony jest w 8-bitowy mikrokontroler typu 8051, co skutkuje niską mocą obliczeniową. Moduł EFR32XG21 również cechuje się niską energochłonnością, jest wyposażony w procesor o wysokiej mocy obliczeniowej oraz obsługuje wiele protokołów komunikacyjnych. Niskimi kosztami charakteryzują się również moduły ESP32 oraz nRF52.

Uwzględniając wszystkie kryteria (cena, energochłonność, moc obliczeniowa, wymiary gabarytowe oraz energochłonność) moduły nRF52 oraz EFR32XG21 są najbardziej korzystnymi rozwiązaniami. Do celów budowy prototypowej wersji sieci sensorycznej wybrano moduły nRF52 firmy Nordic Semiconductor oraz EFR32XG21 firmy Silicon Labs.

Jako zasilanie bateryjne proponuje się zastosowanie ogniwa pierwotnego lub wtórnego o pojemności 1000-1500 mAh. Z przeprowadzonego bilansu energetycznego wynika, że przy zasilaniu źródłem energii o pojemności 1000 mAh, średnia wartość energii pobieranej przez układ pojedynczego węzła w momencie pracy powinna mieścić się w przedziale 5-40 mW. Natomiast w momencie uśpienia zakres ten powinien wynosić 5-50  $\mu$ W.

W celu minimalizacji zużycia energii w trybie uśpienia węzła sieci, proponuje się wyłączenie elementów zasilanych przez mikroprocesor układu radiowego. Może to zostać zrealizowane poprzez zastosowanie klucza tranzystorowego typu MOSFET. Zasilanie typu energy harvesting może zostać wykonane za pomocą superkondensatora do magazynowania energii oraz przetwornicy dostosowującej napięcie elementu odzyskującego energię do napięcia zasilającego układ elektroniczny węzła sieci radiowej.

Tab. 6. Zestawienie parametrów porównywanych modułów radiowych

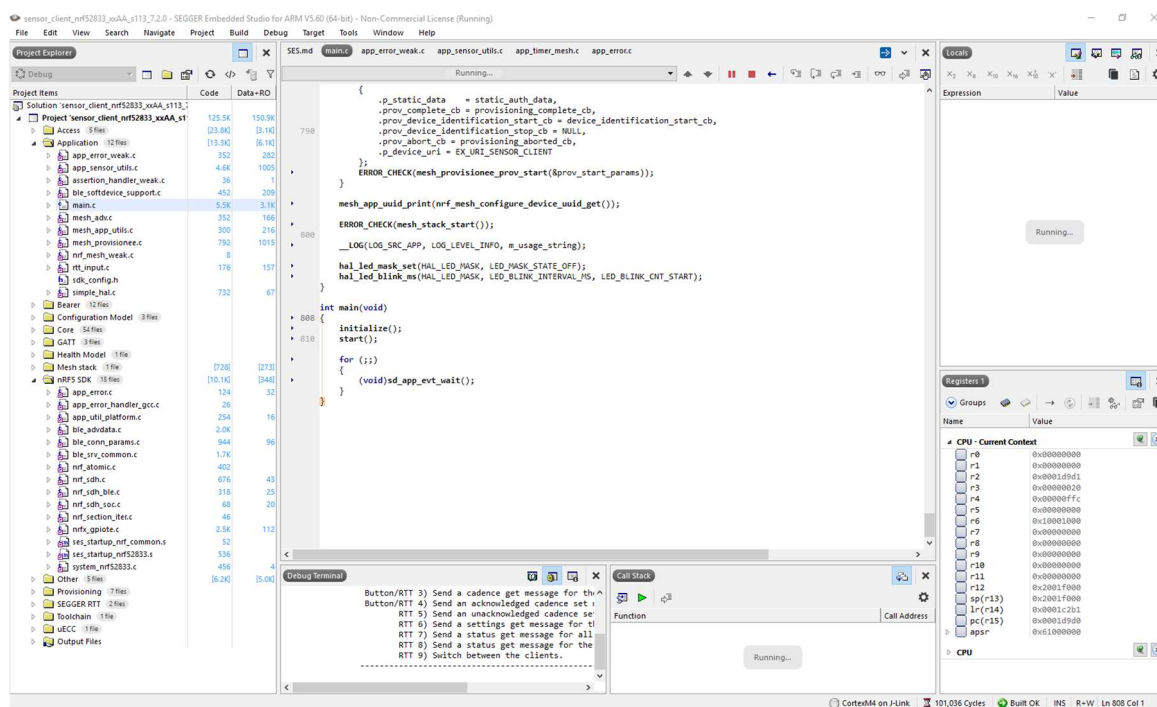
Lp.	Moduł radiowy	Producent	Obsługiwane protokoły	Pobór mocy	Częstotliwość pracy	Interfejsy	Processor
1	nRF52	Nordic Semiconductor	Multi-protocol support	7.5mA TX/ 5.4mA RX przy 3.3V	2.4 GHz	SPI, 2-wire, I <sup>2</sup> S, UART, PDM, QDEC	ARM Cortex-M4
2	EFR32XG21	Silicon Labs	Zigbee, Thread, BLE, Multi-protocol support	10mA RX/TX at 3.3V	2.4 GHz	UART, SPI, SmartCard (ISO 7816), IrDA, I2S, I <sup>2</sup> C	ARM Cortex-M4
3	CC2x	Texas Instruments	ZigBee, RF4CE, IEEE 802.15.4, SimpliciTI, Multi-	29mA TX/ 24mA RX at 3.3V	2.4 GHz, Sub 1GHz	UART	8051
4	ESP32	Espressif Systems	Bluetooth, WiFi	190mA at 3.3V	2.4GHz	SPI, UART, I2S, I <sup>2</sup> C, CAN, ETH	Tensilica Xtensa 32-bit LX6

Wybrane moduły zostały zakupione i wstępnie uruchomione w odpowiednim środowisku IDE (ang. Integrated Development Environment) dostosowanym do konkretnego typu mikroprocesora. W celu uruchomienia modułu radiowego nRF52 konieczne było pobranie dedykowanego oprogramowania SDK (ang. Software Development Kit) ze strony producenta (Nordic Semiconductor) zawierającego stos protokołów komunikacyjnych. Aby urządzenie mogło pracować z użyciem SDK, niezbędne jest wgranie oprogramowania do pamięci wewnętrznej modułu za pomocą dedykowanego środowiska IDE.

W przypadku wybranych układów radiowych nRF52 istnieje możliwość wyboru jednego z trzech rozwiązań IDE:

- Segger Embedded Studio - oprogramowanie udostępniane w darmowej wersji,
- Keil  $\mu$ Vision - płatna licencja oprogramowania, lecz implementacja środowiska SDK nie stanowi większego problemu i jest niezwykle łatwa,
- kompilator GCC ze środowiskiem Eclipse - rozwiązanie darmowe, które wymaga bardzo dużej ilości czasu poświęconej na konfigurację środowiska.

W realizowanej konfiguracji wybrano oraz zainstalowano oprogramowanie IDE Segger Embedded Studio (Rys. 36).



Rys. 36. Widok okna oprogramowania IDE Segger Studio - proces uruchomienia modułu radiowego nRF52

Jako oprogramowanie SDK zaimplementowano nRF5 SDK for Mesh v5.0.0 opracowane przez firmę Nordic Semiconductor, dedykowane do zastosowania w sieciach o topologii kratowej.



SDK nRF5 Mesh v5.0.0 jest implementacją siatki Bluetooth umożliwiającą aplikacjom korzystanie z wszystkich dostępnych funkcji na chipach serii Nordic nRF5. Rozwiązanie wspiera komunikację jeden-do-jednego, jeden-do-wielu oraz wiele-do-wielu, z zastosowaniem protokołu BLE (ang. Bluetooth Low Energy) do wymiany komunikatów między węzłami sieci. Węzły mogą komunikować się ze sobą, o ile znajdują się w bezpośrednim zasięgu radiowym lub istnieje wystarczająca liczba urządzeń mogących nasłuchiwać i przesyłać te wiadomości. Aplikacje użytkownika końcowego są definiowane za pomocą modeli klient-serwer Bluetooth Mesh zdefiniowanych w specyfikacji modelu.

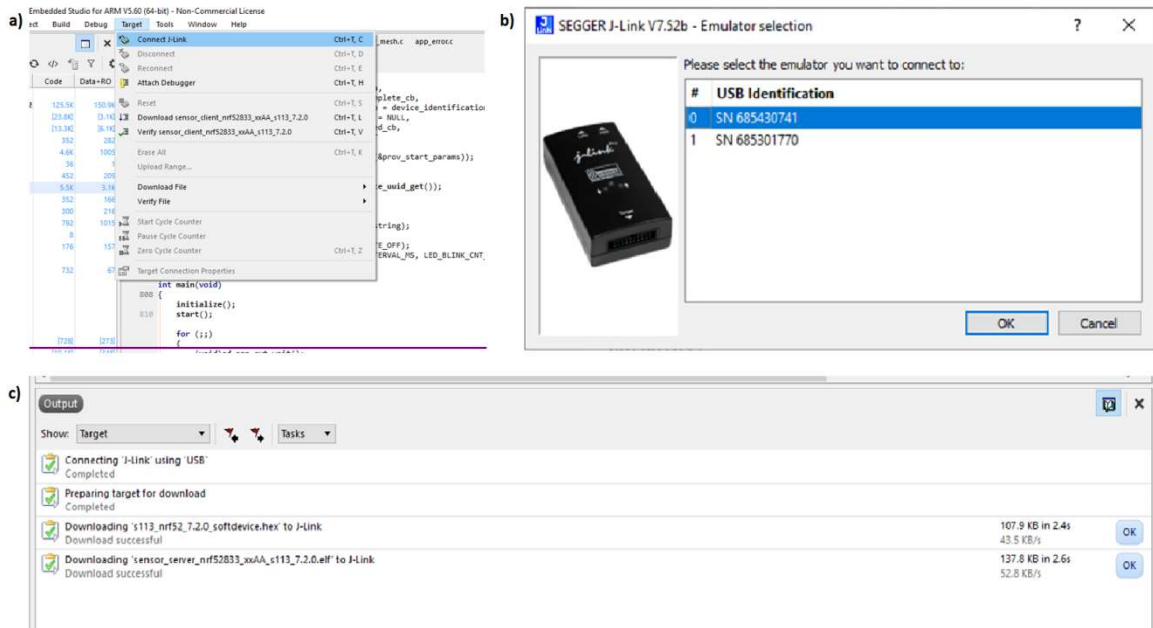
Technologia Bluetooth Low Energy (znana również jako Bluetooth Smart) została wprowadzona jako część specyfikacji Bluetooth 4.0 Core. Wybór tego rozwiązania był podyktowany licznymi zaletami technologii BLE, w tym: niższym zużyciem energii (w porównaniu z innymi technologiami o niskim poborze mocy), darmowym dostępem do oficjalnych dokumentów specyfikacji oraz niższym kosztem modułów i chipsetów.

W celu konfiguracji oraz uruchomienia wstępnej konfiguracji, dwa moduły radiowe zostały podłączone do komputera klasy PC za pomocą przewodów USB (Rys. 37).



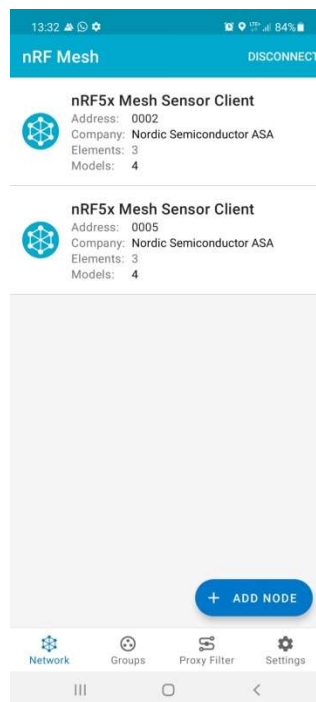
Rys. 37. Widok modułów radiowych nRF52: a) podłączenie dwóch modułów, b) powiększony widok pojedynczego modułu

Za pomocą oprogramowania IDE Segger Studio połączono się z wybranym modułem radiowym (Rys. 38 a, b). Następnie oprogramowanie zostało wgrane do pamięci wewnętrznych obu urządzeń (Rys. 38 c).



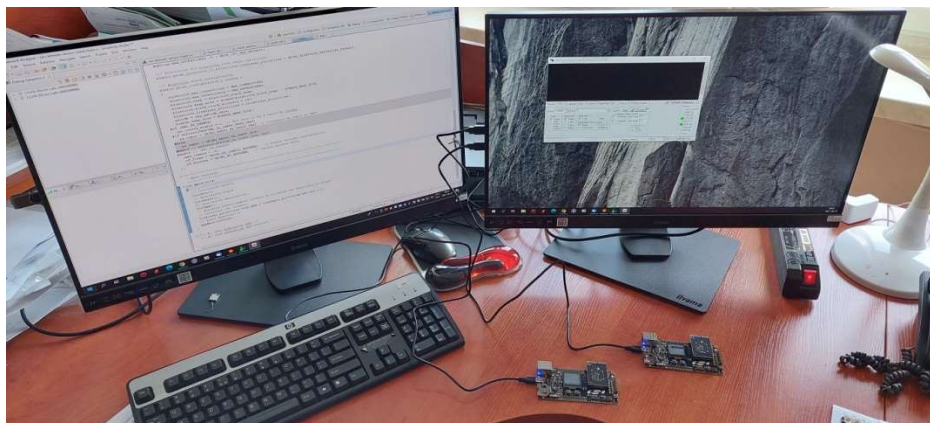
Rys. 38. Widok interfejsu oprogramowania IDE Segger Studio - proces uruchomienia modułu radiowego nRF52: a) połączenie z wewnętrznym debbugerem j-link, b) wykrycie podłączonych układów radiowych, c) realizacja procedury wgrania oprogramowania wewnętrznego do wybranego układu radiowego

Następnie na urządzeniu z systemem operacyjnym Android w wersji 11 zainstalowano i uruchomiono oprogramowanie nRF Mesh, przy czym wykryto obecność obu modułów radiowych w sieci Mesh (Rys. 39).



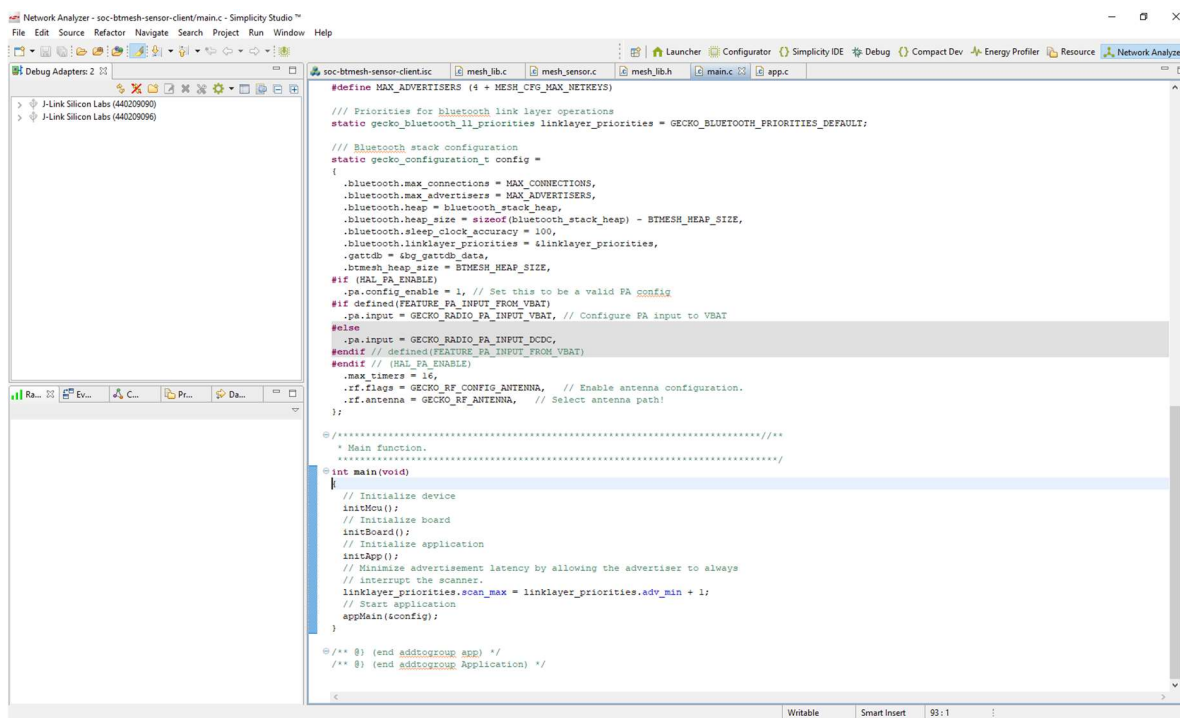
Rys. 39. Widoczność układów radiowych w sieci Mesh - aplikacja nRF5 Mesh na system Android

W następnym kroku przystąpiono do uruchomienia modułów radiowych EFR32XG21 firmy Silicon Labs (Rys. 40).



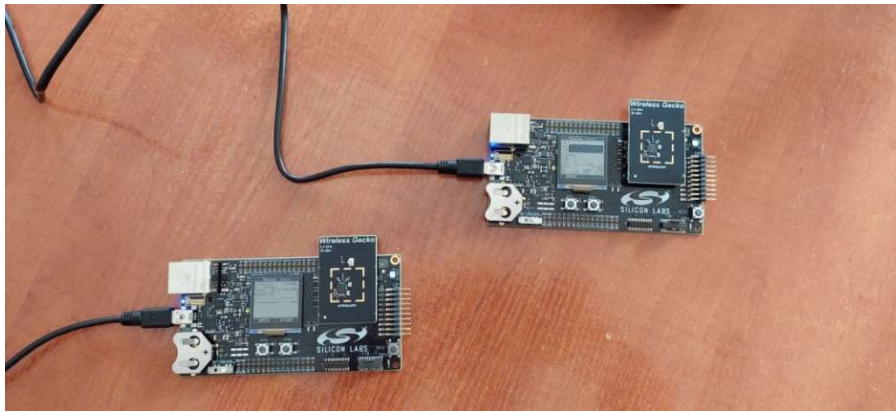
Rys. 40. Stanowisko uruchomieniowe modułów radiowych EFR32XG21

W celu uruchomienia modułów EFR32XG21 zastosowano środowisko IDE Simplicity Studio dedykowane przez producenta (firmę Silicon Labs; Rys. 41). Jako oprogramowanie wewnętrzne układu EFR32XG21 zastosowano Bluetooth Mesh SDK.



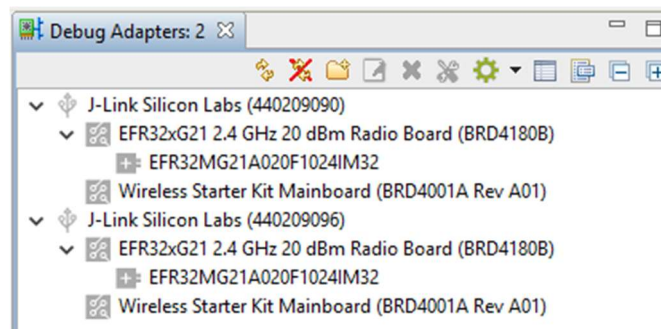
Rys. 41. Widok ekranu głównego okna środowiska Simplicity Studio IDE modułu EFR32XG21

Obydwa konfigurowane moduły radiowe podłączone zostały do komputera za pomocą przewodów USB (Rys. 42).



Rys. 42. Widok modułów radiowych EFR32XG21

Oprogramowanie Simplicity Studio wykryło obecność obu modułów radiowych (Rys. 43), co potwierdziło poprawność konfiguracji oraz wzajemnej komunikacji modułów.



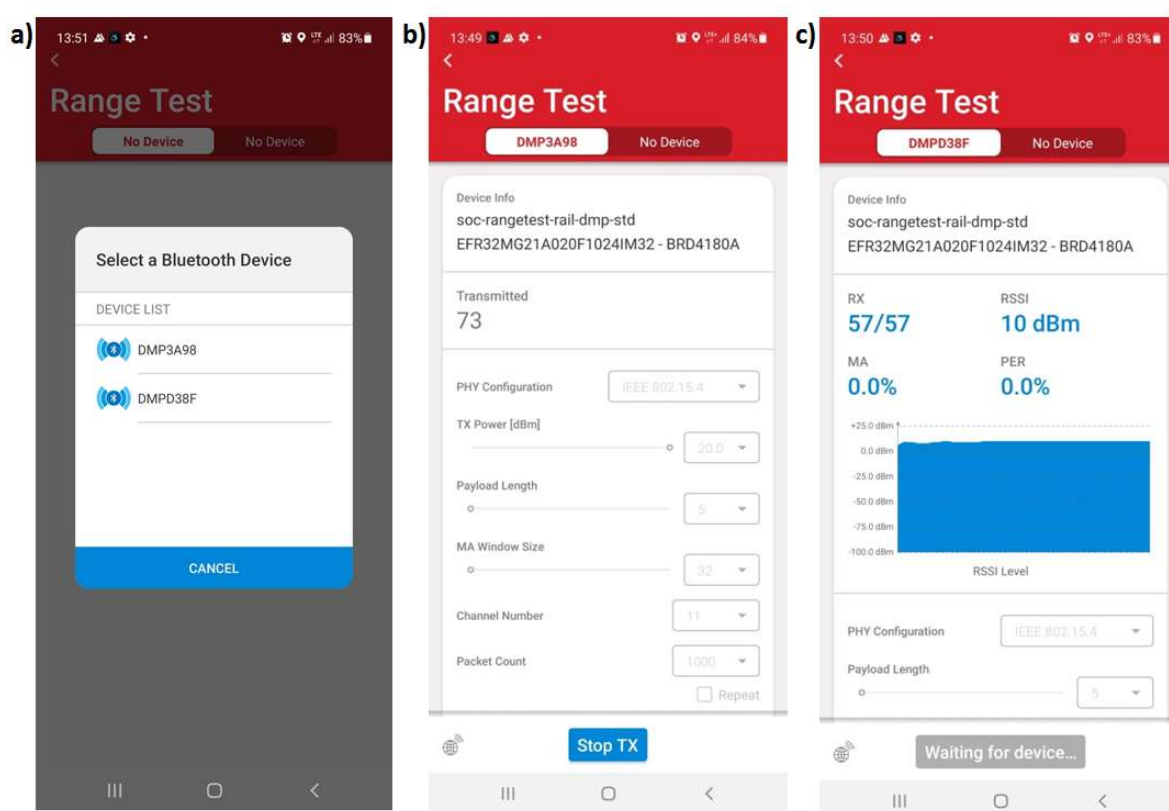
Rys. 43. Widok ekranu środowiska Simplicity Studio IDE modułu EFR32XG21 - okno informacji na temat wykrytych modułów debuggerów sprzętowych

Następnie wgrano oprogramowanie do poszczególnych modułów radiowych. Za pomocą przycisków oraz wyświetlacza dostępnego na płytach PCB skonfigurowano poszczególne moduły w odpowiedni tryb pracy (Rys. 44).



Rys. 44. Widok modułu radiowego EFR32XG21 (skonfigurowany jako nadajnik)

Obydwa moduły zostały następnie uruchomione. W module nadawczym widoczna była liczba wysyłanych pakietów, natomiast na wyświetlaczu modułu odbiorczego wskazywane było potwierdzenie odebrania wysyłanych pakietów danych. Dodatkowo po zainstalowaniu aplikacji EFR Connect (na urządzeniu z systemem operacyjnym Android w wersji 11) wykryto obecność w sieci obydwu modułów radiowych (Rys. 45). EFR Connect to aplikacja mobilna BLE do szybkiego i łatwego opracowywania technologii Bluetooth Low Energy. Aplikacja podzielona jest na dwa główne obszary funkcjonalne, widok Demo i widok Develop. Widok Demo zawiera wersje demonstracyjne do szybkiego testowania przykładowych aplikacji w Silicon Labs GSDK, który jest dostępny za pośrednictwem Simplicity Studio. EFR Connect współpracuje ze wszystkimi zestawami rozwojowymi Bluetooth, SoC i modułami Silicon Labs.

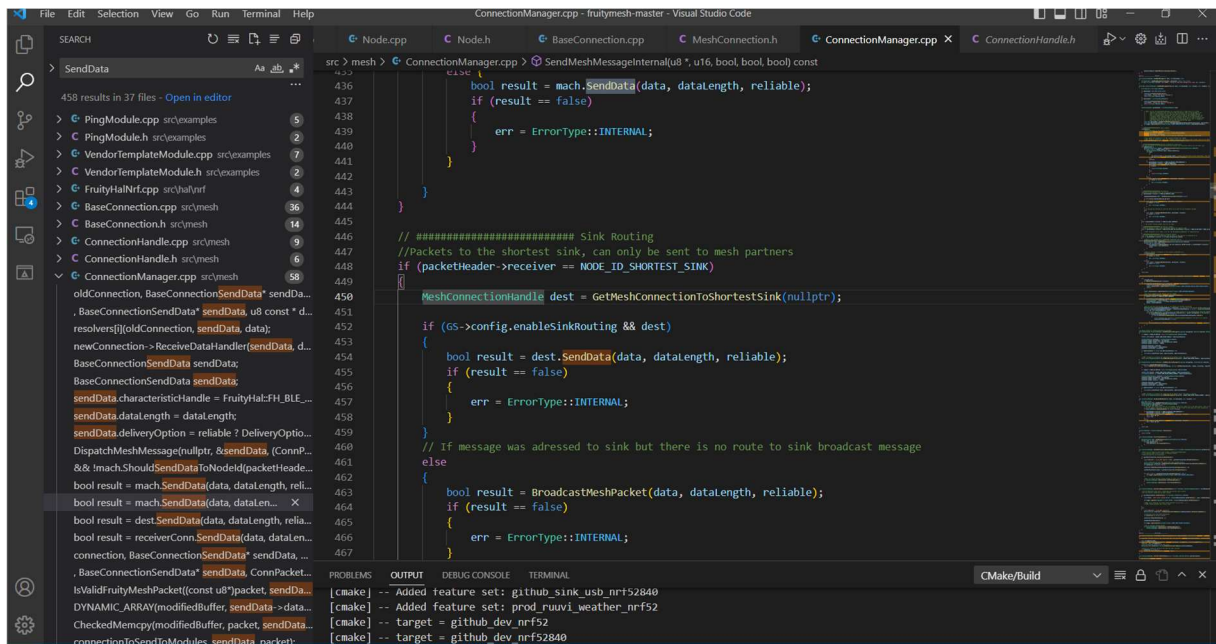


Rys. 45. Widok okien aplikacji EFR Connect firmy Silicon Labs dedykowanej na system Android: a) wykrycie obecności modułów w sieci, b) podgląd danych modułu nadawczego, c) podgląd danych modułu odbiorczego

W trakcie przebiegu testów środowisk programistycznych modułów radiowych zidentyfikowano problem w postaci braku możliwości swobodnej modyfikacji oprogramowania modułów radiowych EFR32 przez dedykowane środowisko IDE. Brak tej funkcjonalności uniemożliwił implementację własnego algorytmu trasowania. W związku z tym zrezygnowano z użycia modułu radiowego EFR32. Do realizacji procesu walidacji zastosowano procesor nRF52 firmy Nordic Semiconductor oraz oprogramowanie Microsoft Visual Studio, wraz ze stosem FruityMesh bazującym na warstwie połączeniowej Bluetooth 4.0.

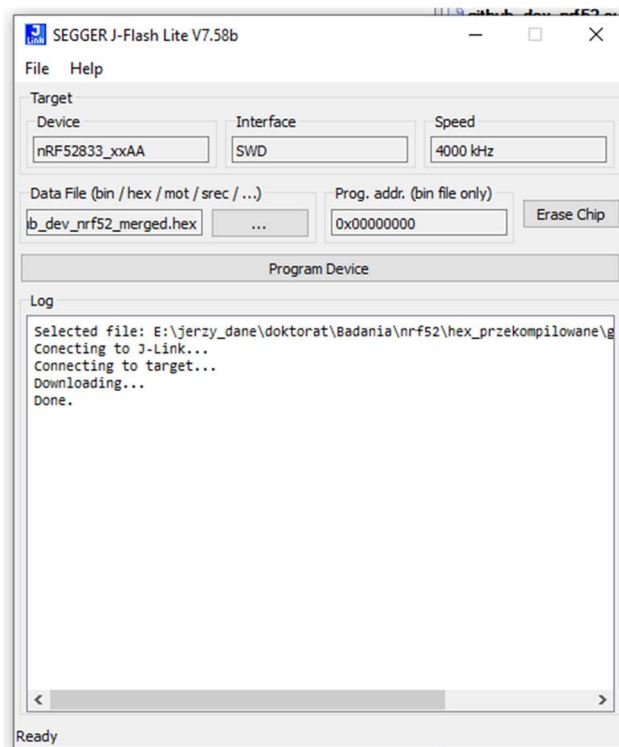
## 5.2. Prototypowanie oprogramowania modułów radiowych nRF52

W celu implementacji algorytmu trasowania do wyspecyfikowanego modułu radiowego nRF52 opracowane zostało oprogramowanie bazujące na stosie programowym FruityMesh [85]. W celu umożliwienia rozbudowy oraz testowania oprogramowania kod źródłowy skompilowano w środowisku programistycznym Visual Studio Code (Rys. 46).



Rys. 46. Widok środowiska programistycznego modułu radiowego nRF52

Główny kod programu został zawarty w części stosu oprogramowania związanego z obsługą węzła (Node.c). W obsłudze przerwań przycisków umieszczono oprogramowanie odpowiadające za wysyłanie pakietów danych w sieci sensorycznej. W przerwaniach odpowiedzialnych za odbiór danych sieciowych zawarto oprogramowanie interpretujące przesyłane dane, a także funkcje związane z wysyłaniem informacji diagnostycznych poprzez port USB do mikrokomputerów typu Raspberry Pi. W przypadku węzła typu SINK dodatkowo w przerwaniach definiujących odbiór danych zaimplementowane zostały funkcje odpowiedzialne za realizację obliczeń algorytmu protokołu trasowania. Oprogramowanie było tak skonfigurowane, aby osobno można było realizować kompilację oprogramowania w odniesieniu do węzłów typu NODE oraz węzła typu SINK. W przypadku każdego typu węzła (w wyniku kompilacji oprogramowania) generowane były pliki binarne. Pliki wgrywane były następnie do mikrokontrolerów za pomocą oprogramowania Segger J-Link - J-Flash (Rys. 47) oraz oprogramowania Nrf Connect (dedykowanego przez producenta modułów nRF52).



Rys. 47. Widok okna oprogramowania J-Flash firmy Segger

W kolejnym rozdziale omówione zostały funkcję oraz procedury obsługujące dane diagnostyczne przesyłane z modułów radiowych nRF52 do komputerów Raspberry Pi poprzez złącze USB.

### 5.3. Opracowanie oprogramowania mikrokomputera typu Raspberry Pi

Rozbudowa sieci sensorycznej do liczby 30 węzłów wymusiła konieczność rozszerzenia części diagnostycznej, aby spełnić przyjęte kryteria optymalizacji ścieżek pakietów danych. W modelu sieci składającej się z trzech węzłów dane diagnostyczne były dostarczane do oprogramowania G-MESH zainstalowanego na komputerze PC za pomocą złącza USB symulującego port szeregowy. W prototypie rozbudowanej sieci konieczne było dodanie dodatkowych urządzeń w celu dostosowania funkcjonalności infrastruktury pomiarowej do postawionych w projekcie wymagań. W tym celu zastosowano komputery Raspberry Pi z systemem operacyjnym Raspbian. Na wspomnianym systemie operacyjnym uruchomiono aplikację działającą w tle (napisaną w języku Python), która odczytywała dane pomiarowe z modułów radiowych nRF52 i przesyłała je za pomocą protokołu MQTT do aplikacji G-MESH (Rys. 48 oraz Rys. 49).

Aplikacja `nodes_control_data.py` (Rys. 48) odpowiadała za odbiór danych diagnostycznych, przesyłanych z modułów radiowych nRF52 pracujących w sieci sensorycznej jako węzły typu NODE. Zaimplementowano w niej obsługę urządzenia `ttyACM` (jest to rodzaj emulacji portu szeregowego stosowany w systemach typu Linux przez urządzenia USB). Dane odbierane były z emulatora portu szeregowego i dzięki zaimplementowanej obsłudze klienta protokołu MQTT przekazywane do

aplikacji G-MESH. W celu wysyłania informacji poprzez protokół MQTT konieczne było podanie danych brokera MQTT oraz tematu publikowanych danych poprzez protokół MQTT. Do danych przesyłanych przez opracowaną aplikację dodawane były znaczniki czasowe (system operacyjny Rasbian synchronizował dane czasowe poprzez protokół NTP. Komputer Raspberry Pi podłączony był poprzez sieć WiFi z ruterem sieciowym).

```
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()
                #strt_index=data.rindex(b":") #data.find(b":")+1
                #strt_index+=2
                #end_index =data.find(b",")
                #data_node=data[strt_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"{strt_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. 48. Kod aplikacji nodes\_control\_data.py zainstalowanej na komputerze Raspberry Pi obsługującego węzły typu NODE

Aplikacji sink\_data.py (Rys. 49) realizowała funkcje zbliżone do przedstawionej wcześniej aplikacji obsługując odbiór danych z węzła typu SINK. Aplikacja realizowała również obsługę emulatora portu szeregowego ttyACM, w przypadku jednak tej aplikacji ilość odbieranych danych była znacząca większa, ze względu na to, że w sieci sensorycznej wszystkie dane kierowane były do węzła typu SINK. Aplikacja po odebraniu danych diagnostycznych publikowała je w odpowiednim temacie poprzez protokół MQTT.



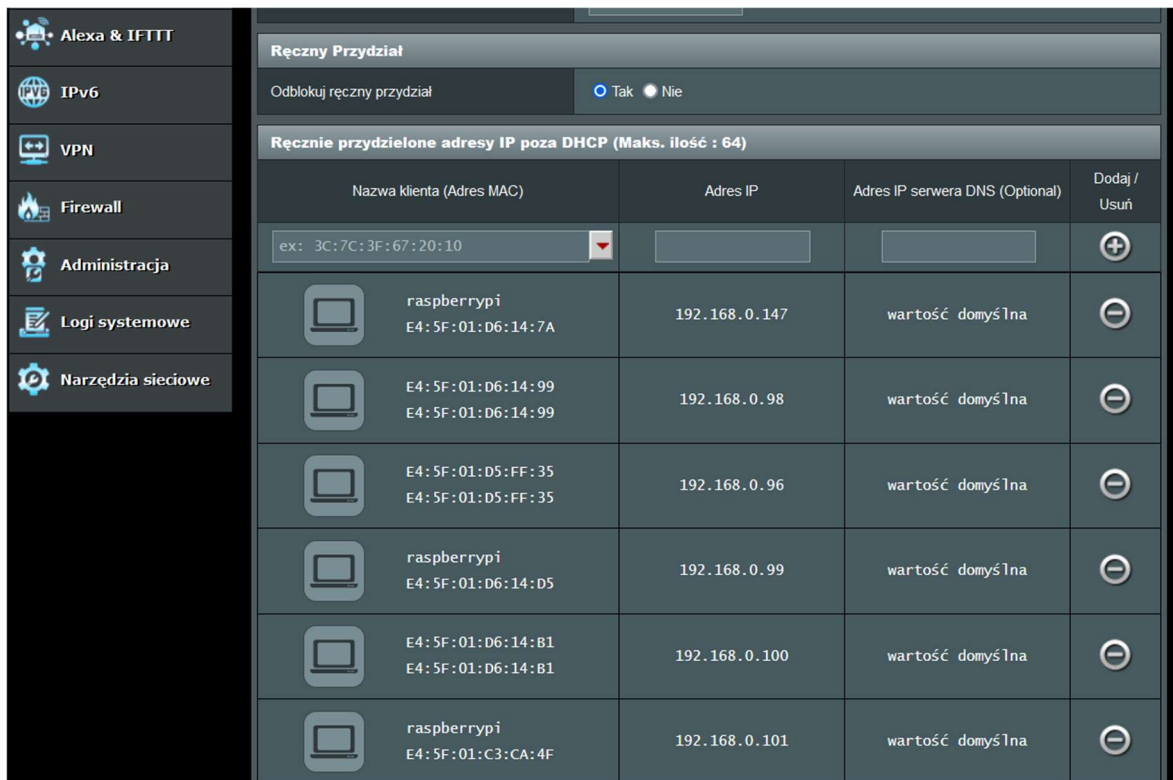
```
GNU nano 5.4 sink_data.py
import glob
import pyudev
import serial
import threading
import time
import paho.mqtt.client as mqtt

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}")
                    #strt_index=data.find(b":")+1
                    #end_index =data.find(b",")
                    #data_node=data[strt_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. 49. Kod aplikacji sink\_data.py zainstalowanej na komputerze Raspberry Pi obsługującego węzeł typu SINK

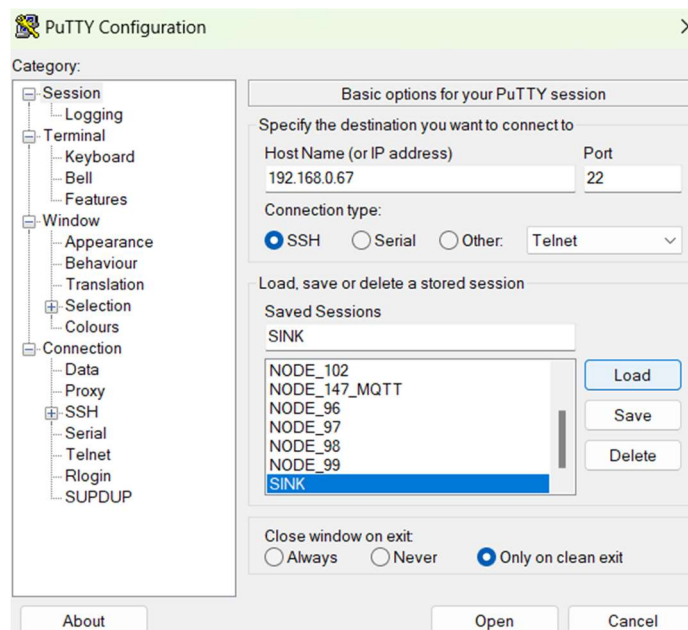
W strukturze sieci umieszczono również Router-WiFi, który przydzielał pulę adresów IP poszczególnych komputerów RaspberryPi (Rys. 50). W celu możliwości łączenia się z każdym z mikrokomputerów poprzez protokół SSH (ang. Secure Shell), konieczna była odpowiednia konfiguracja serwera DHCP (ang. Dynamic Host Configuration Protocol), pracującego na routerze sieciowym. Jest to protokół sieciowy, który automatycznie przydziela urządzeniom w sieci lokalnej adresy IP oraz inne parametry konfiguracyjne, takie jak maska podsieci, brama domyślna czy adresy serwerów DNS.

Router został skonfigurowany w ten sposób, aby wyznaczonemu adresowi MAC (ang. Media Access Control) mikrokomputera Raspberry Pi przydzielane były odpowiednie adresy IP. Adres MAC jest unikalnym adresem fizycznym przypisywany każdemu interfejsowi sieciowemu przez producenta sprzętu. Identyfikuje więc każdy z mikrokomputerów. Pula adresów MAC oraz odpowiadające im adresy IP przedstawione zostały na rysunku 50.



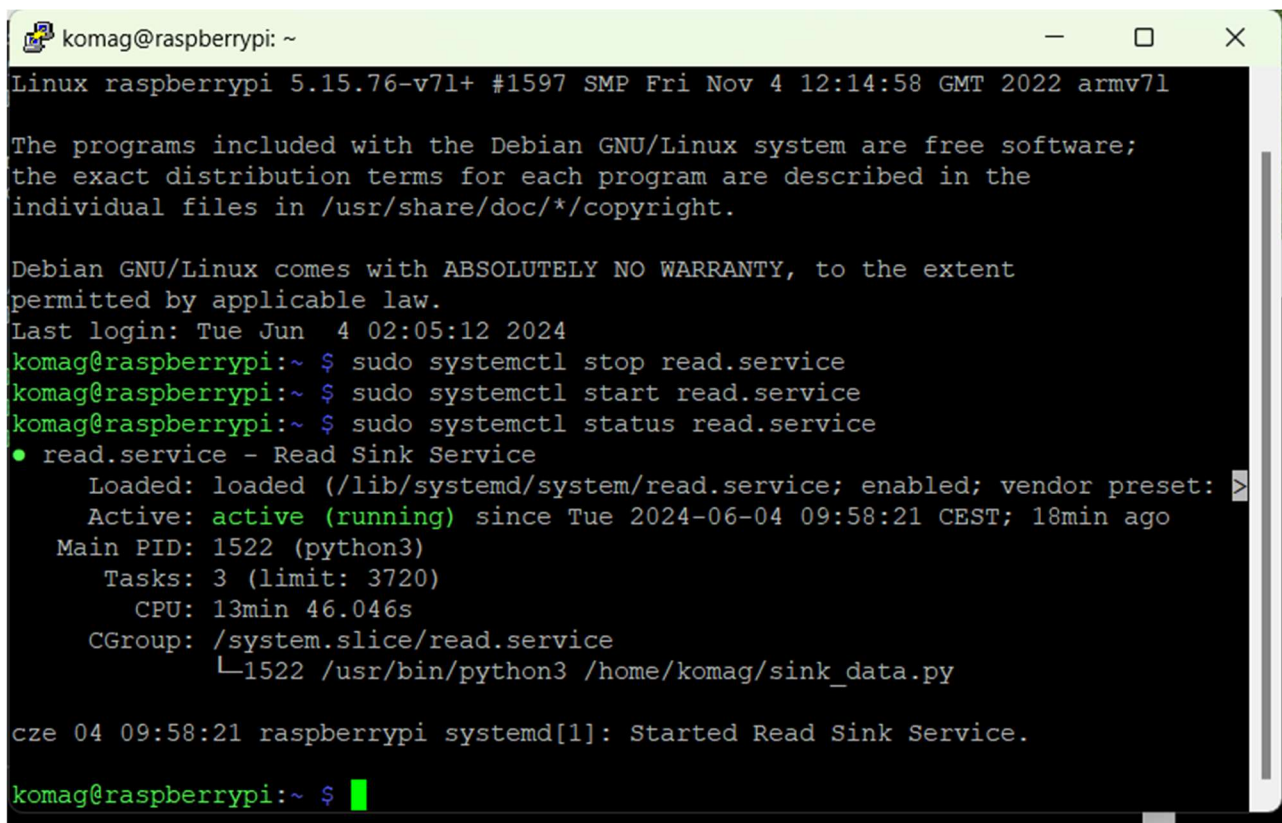
Rys. 50. Widok pulpitu zarządzania routera z widocznymi urządzeniami Raspberry Pi

Dzięki konfiguracji adresu IP każdego z urządzeń możliwe było połączeniu się z nim poprzez protokół SSH korzystając z aplikacji Putty. Putty to darmowe oprogramowanie klienckie dedykowane do użycia w systemie Windows (dostępne również na inne platformy), które umożliwia połączenia zdalne przez różne protokoły, w tym SSH. Oprogramowanie zostało użyte do zarządzania pracą mikrokomputerów Raspberry Pi (Rys. 51 oraz Rys. 52).



Rys. 51. Widok okna aplikacji Putty używanej do połączenia z mikrokomputerami Raspberry Pi poprzez protokół SSH

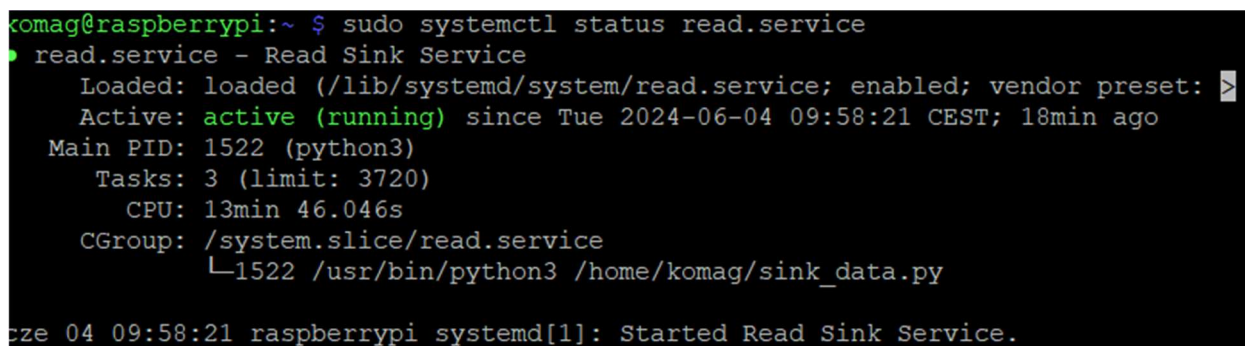
Na samym początku walidacji algorytmów trasowania protokół SSH umożliwił napisanie programów obsługujących odbiór danych diagnostycznych z poszczególnych węzłów sieci. Posłużył również do zdalnego uruchamiania tych programów (Rys. 53). Przy uruchamianiu oprogramowania na 9 mikrokomputerach obsługa okazała się uciążliwa. Opracowana została więc metoda uruchamiania napisanego oprogramowania jako procesu działającego w tle.



```
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. 52. Widok przykładowego okna komunikacji z komputerem Raspberry Pi poprzez protokół SSH

Skrypt napisany w języku Python uruchamiany był przez narzędzie systemowe SystemD (zaawansowany system zarządzania usługami w systemach operacyjnych z rodziny Linux). Jest to narzędzie odpowiedzialne za uruchamianie, zatrzymywanie i zarządzanie procesami oraz usługami na poziomie zainstalowanego na komputerze systemu operacyjnego. W przypadku obsługi węzła SINK zastosowano skrypt sink\_data.py (Rys. 53).



```
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. 53. Serwis obsługujący oprogramowanie komputera Raspberry Pi do którego podłączony był węzeł typu SINK

Natomiast w przypadku węzła NODE zaadaptowano skrypt `nodes_control_data.py` (Rys. 54).

```
komag@raspberrypi:~ $ sudo systemctl status read.service
● read.service - Read Node Service
   Loaded: loaded (/lib/systemd/system/read.service; enabled; vendor preset: )
   Active: active (running) since Tue 2024-06-04 12:40:44 CEST; 2s ago
     Main PID: 2441 (python3)
        Tasks: 7 (limit: 3720)
            CPU: 4.709s
   CGroup: /system.slice/read.service
           └─2441 /usr/bin/python3 /home/komag/nodes_control_data.py
```

Rys. 54. Serwis obsługujący oprogramowanie komputera Raspberry Pi do którego podłączone były węzły typu NODE

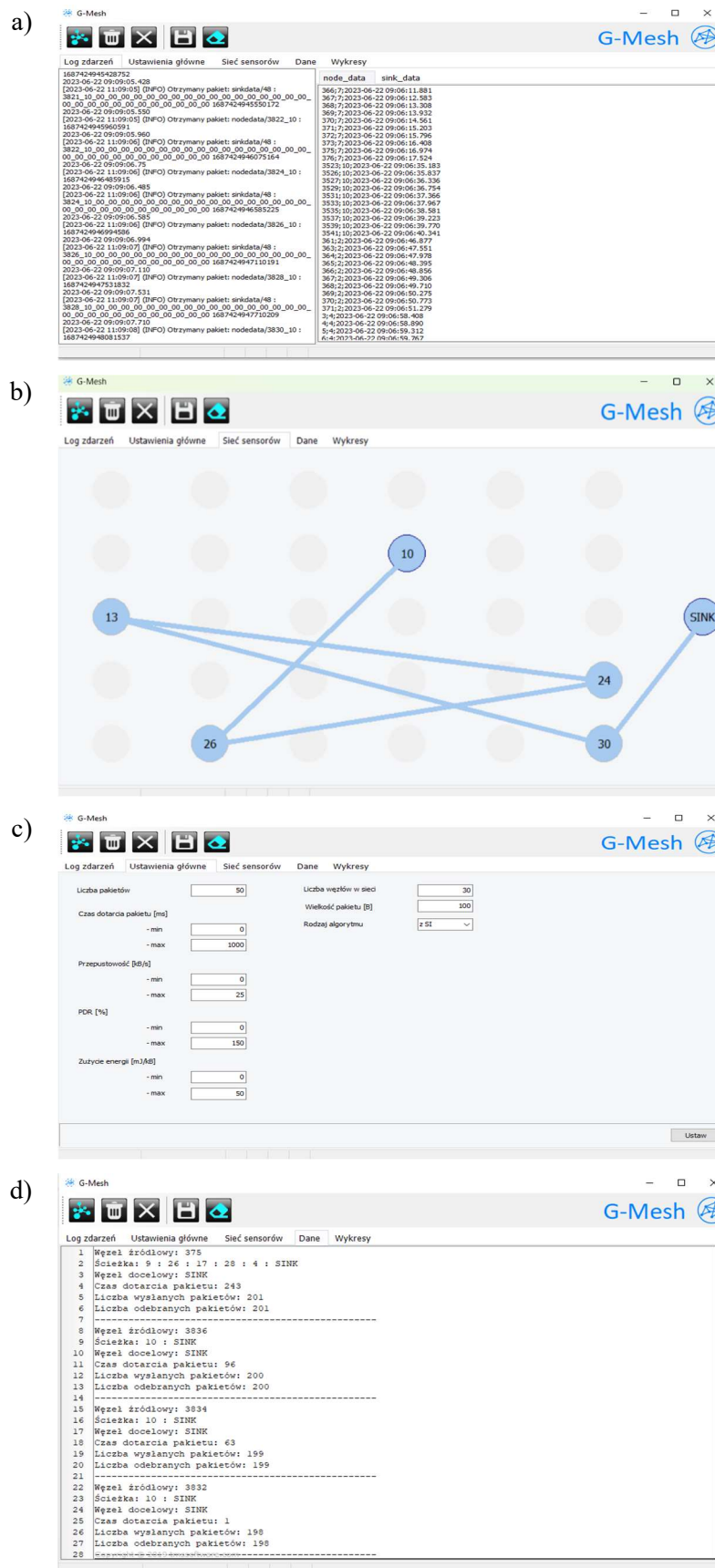
Tak sformułowana procedura uruchamiania aplikacji w tle usprawniła proces realizacji kolejnych walidacji algorytmu trasowania oraz przesyłania danych do aplikacji G-MESH. W kolejnym rozdziale szczegółowo omówiono sposób działania tej aplikacji.

## 5.4. Opracowanie oprogramowania analizującego dane na komputerze klasy PC

Do wizualizacji danych pomiarowych opracowano dedykowane oprogramowanie GMESH. W pierwszej wersji oprogramowanie odczytywało dane pomiarowe jedynie poprzez symulowane porty szeregowo UART (przypadek obsługi sieci składającej się z trzech węzłów).

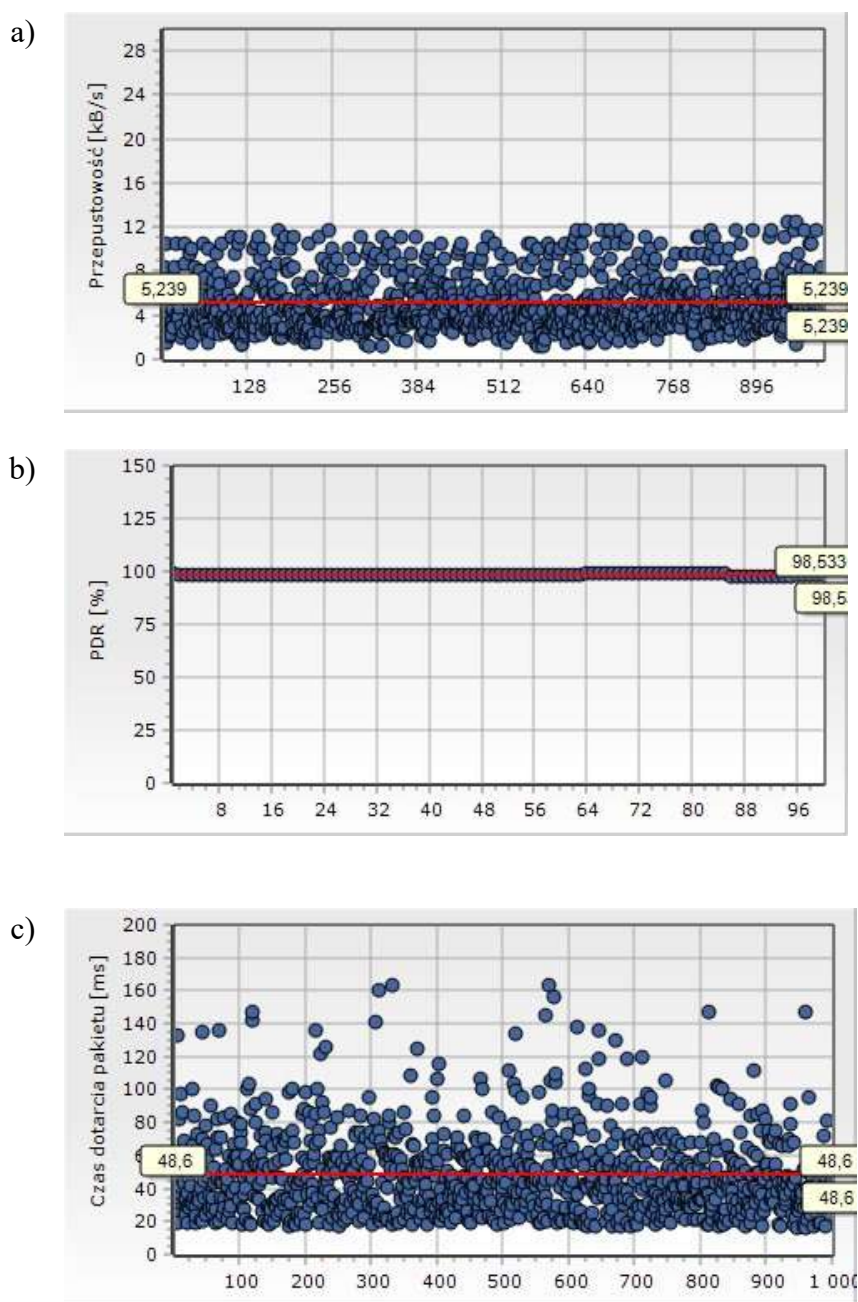
Druga wersja oprogramowania została rozszerzona o funkcje umożliwiające pracę z rozbudowaną strukturą sieci sensorycznej. W tym celu zaimplementowano funkcje odbierania i wysyłania danych za pomocą protokołu MQTT. Po lewej stronie ekranu wyświetlane są wszystkie ramki danych otrzymanych z sieci MQTT. Po prawej stronie ekranu wyróżnione zostały dane wysyłane z węzłów typu NODE oraz z węzła typu SINK (Rys. 55a). Dodano także dodatkowe okna aplikacji umożliwiające wizualizację ścieżki transmisji danych z węzła typu NODE do węzła typu SINK (Rys. 55b).

Jedno z okien jest odpowiedzialne za wyświetlanie danych odbieranych bezpośrednio z brokera MQTT, podczas gdy odrębne zakładki służą do podziału danych pochodzących z węzłów NODE i SINK (Rys. 55d). Ponadto oprogramowanie wzbogacono o możliwość konfiguracji danych wyświetlanych na wykresach, co umożliwia bardziej elastyczną analizę danych pomiarowych (Rys. 55c).



Rys. 55. 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 56 przedstawiono przykładowe wykresy danych pomiarowych możliwych do wygenerowania przez opracowaną aplikację. Aplikacja posiada możliwość konfiguracji wartości maksymalnych wyświetlanych na poszczególnych osiach wykresów. Możliwe jest również konfigurowanie liczby odebranych pakietów, po których nastąpi wyświetlenie wartości średniej otrzymanych danych pomiarowych. W celu umożliwienia późniejszej analizy danych pomiarowych po wyświetleniu wartości uśrednionej na wykresie zapisywany on jest w postaci pliku graficznego we wskazanym miejscu na dysku.



Rys. 56. 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

W kolejnych wersjach oprogramowania zaimplementowany został zapis danych pomiarowych do bazy danych, a także możliwość ich zapisu w plikach zgodnych z formatem programem Excel. Takie podejście było konieczne w celu prowadzenia rozbudowanych analiz statystycznych pozyskanych danych.

W ramach badań opracowano środowisko walidacji algorytmu trasowania sieci składającej się z trzech węzłów oraz środowisko pracujące w sieci zbudowanej maksymalnie z 30 węzłów. Wyselekcjonowano moduł radiowy (nRF52 firmy Nordic Semiconductor), który pełni funkcję węzłów sieci. Do wszystkich elementów sprzętowych środowiska walidacji opracowano oprogramowanie umożliwiające implementację oraz przeprowadzenie badań algorytmu, wraz z pomiarem określonych parametrów pracy sieci sensorycznej. Utworzono również autorskie oprogramowanie GMESH umożliwiające wizualizację zawartości pakietów diagnostycznych przesyłanych z sieci sensorycznych, ścieżek transmisji danych oraz przedstawienie zależności czasowych poszczególnych kryteriów przyjętych do oceny sieci sensorycznej.

## 6. Badania sieci sensorycznej

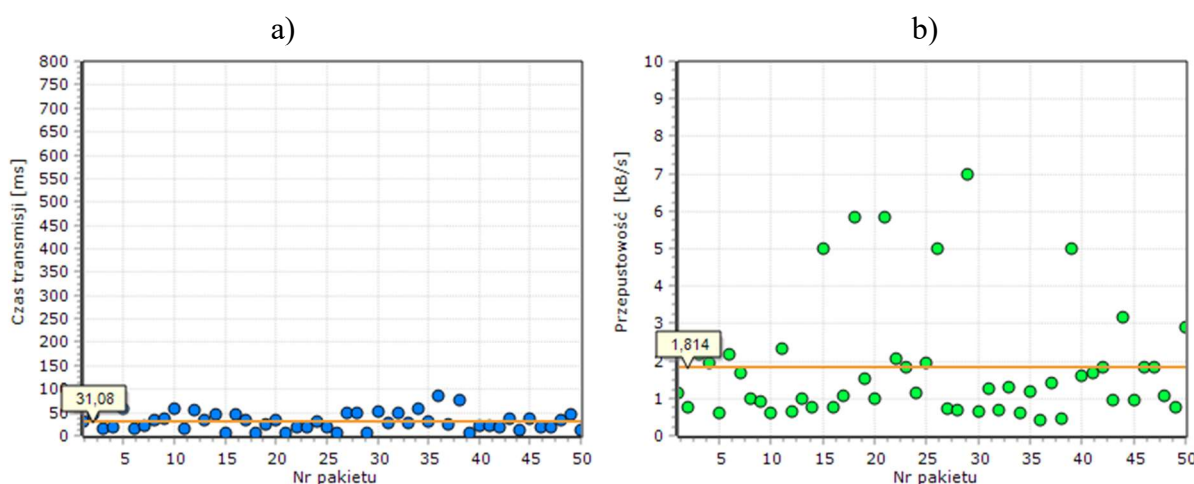
Testy oraz walidacja projektowanej sieci sensorycznej zostały podzielone na dwa etapy obejmujące badanie: modelu sieci składającego się z trzech węzłów oraz prototypu sieci złożonego z 30 węzłów. Badania przeprowadzono zgodnie z metodą opisaną w rozdziale 4 oraz przy zastosowaniu opracowanego środowiska walidacji opisanego w rozdziale 5. W kolejnych podrozdziałach przedstawiono proces realizacji badań oraz analizę danych pomiarowych.

Rozdział 6.1 poświęcono badaniom modelu sieci sensorycznej z 3 węzłami. W przypadku opisanej konfiguracji rejestrowano czas dotarcia pakietów oraz przepustowość sieci, jak również wartość poboru prądu poszczególnych modułów radiowych. W rozdziale 6.2 opisano topologię, model fizyczny oraz konfigurację sieci sensorycznej o zmiennej liczbie węzłów (złożonej z 5-30 węzłów) oraz zestawiono wyniki badań. W rozdziale 6.3 przedstawiono analizę statystyczną danych pomiarowych (pozyskanych w wyniku działania algorytmów bez oraz z inteligencją roju), jak również omówienie wniosków z przeprowadzonych badań.

### 6.1. Badania modelu sieci sensorycznej - struktura z 3 węzłami

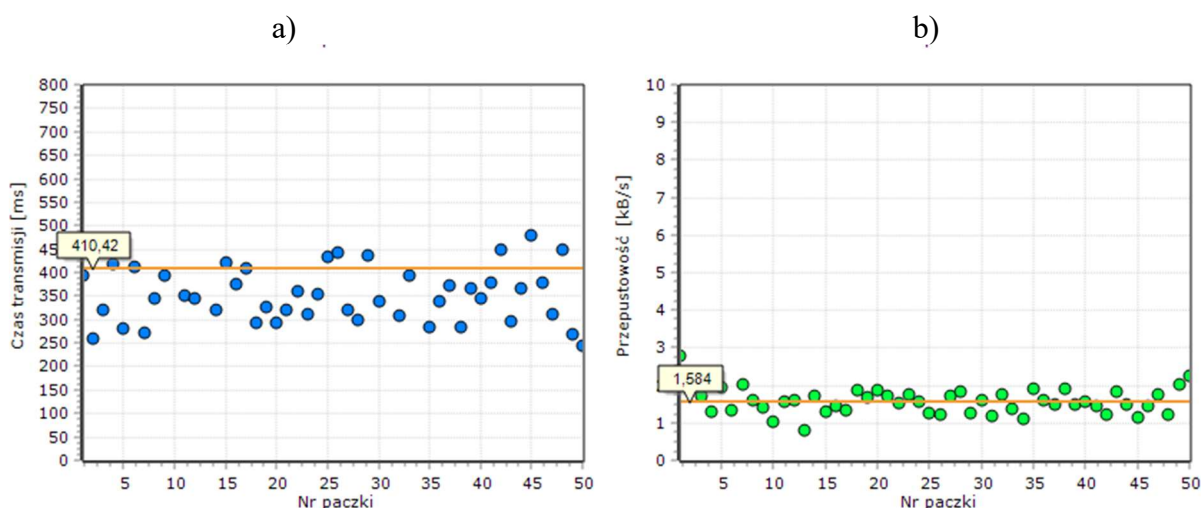
W pierwszym kroku wykonano badanie kluczowych kryteriów w postaci czasów dotarcia pakietu do miejsca docelowego oraz przepustowości sieci algorytmu z trzema węzłami, przy czym założono odrębne przypadki przesyłania jednego pakietu oraz paczki danych.

W trakcie walidacji algorytmów w modelu sieci sensorycznej uzyskano następujące wyniki pomiarów wartości przyjętych do oceny kryteriów (Rys. 57 oraz Rys. 58).



Rys. 57. 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. 58. 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 Rys. 57 oraz Rys. 58 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 tabelicy 7.

Tab. 7. Uśrednione wartości czasów dotarcia pakietu z węzła typu NODE do węzła typu SINK

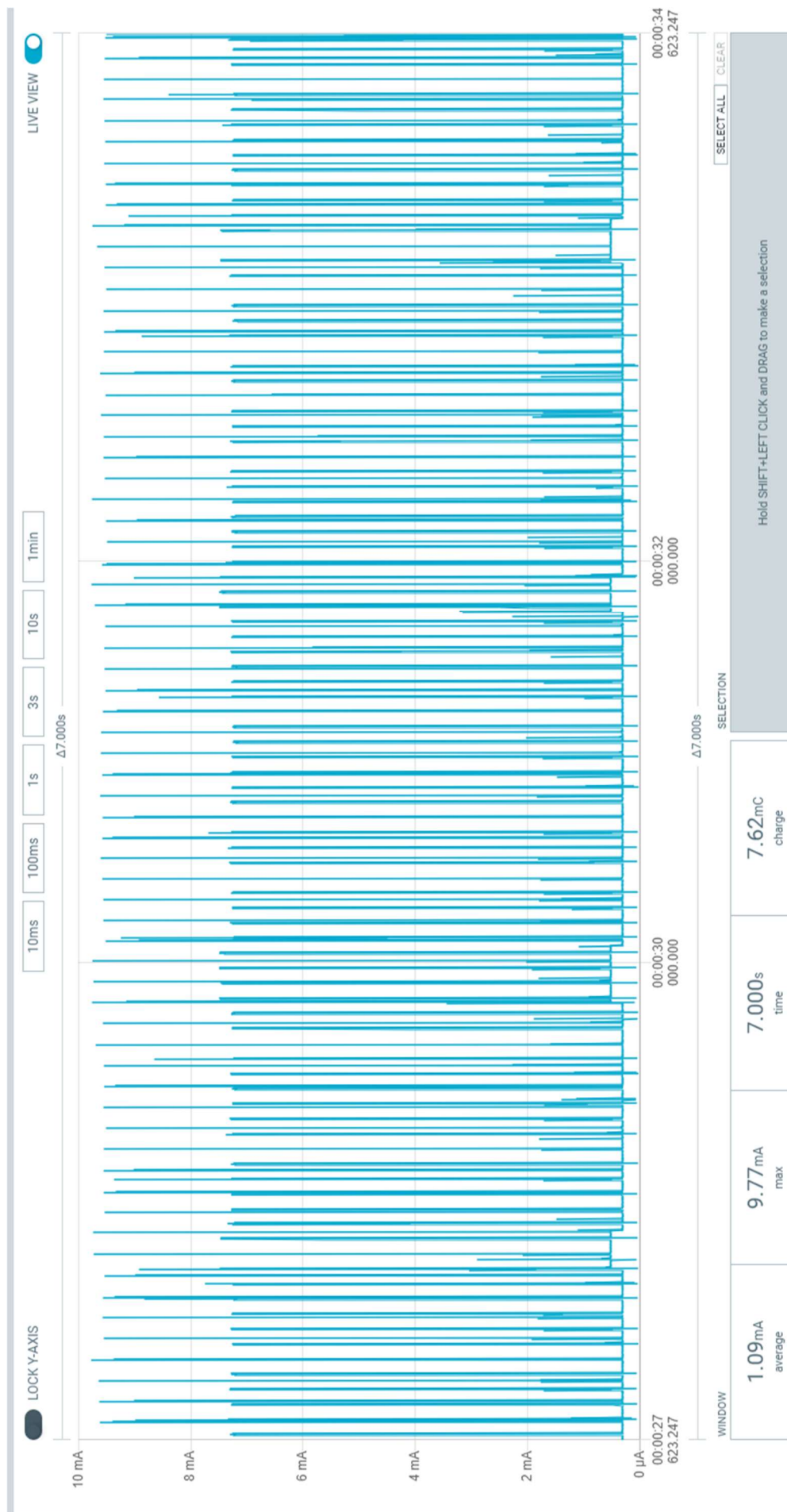
Lp.	Algorytm trasowania	Czas dotarcia pakietu [ms]
1	Optymalizacji rojem cząstek	31 pakiet; 410 paczka
2	Mrówkowy	28 pakiet; 390 paczka
3	Pszczeli	35 pakiet; 430 paczka

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

Tab. 8. Uśrednione wartości przepustowości sieci z węzła typu NODE do węzła typu SINK

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%.



Rys. 59. Wykres poboru prądu węzła typu NODE modelu sieci sensorycznej

Węzeł typu NODE został wyposażony w moduł pomiaru natężenia prądu. W przypadku każdego algorytmu przeprowadzono pomiar poboru prądu przez węzeł podczas realizacji procedury przesyłania danych. Na rysunku Rys. 59 przedstawiono wartości natężenia prądu pobieranego przez elektronikę węzła typu NODE w czasie oczekiwania, transmisji danych i uspienia. Średnia wartość natężenia prądu w przypadku każdego z testowanych algorytmów wynosiła około 1 mA.

W wyniku przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

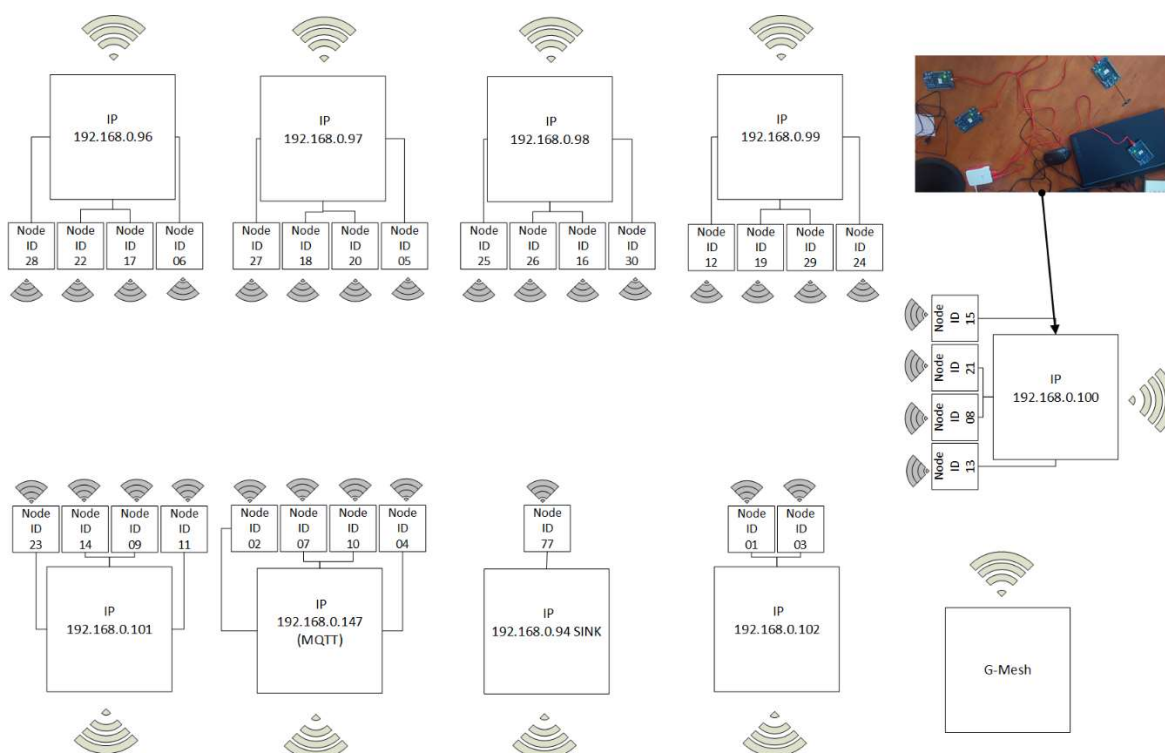
- wartości kryteriów zaimplementowanych algorytmów różniły się nieznacznie pomiędzy sobą oraz w porównaniu z wynikami uzyskanymi z zastosowaniem algorytmu bazowego (reaktywnego) sieci Fruity Mesh, W przypadku czasu dotarcia pojedynczych pakietów danych były to wartości kilku milisekund, natomiast w przypadku czasu dotarcia przesyłanych paczek danych były to wartości kilkudziesięciu milisekund. Różnice w rejestrowanej przepustowości przesyłanych danych mieściły się w granicach kilkunastu dziesiętnych wartości kB/s,
- w dalszej implementacji odrzucony został algorytm pszczeli ze względu na najdłuższe czasy realizacji procedury wyboru optymalnej ścieżki przesyłu pakietu danych, które w przypadku rozbudowanych sieci wykazują tendencję wzrostu eksponentyjnego,
- proces implementacji algorytmów w modelu sieci pozwolił zauważyć, że w przypadku algorytmu mrówkowego i pszczelego istnieje również ryzyko powstawania zapętleń w sieci (wybór najlepszego partnera węzła typu NODE może spowodować, że informacja nie dotrze do węzła docelowego). W przypadku algorytmu mrówkowego każdy węzeł typu NODE musi na bieżąco obliczać i aktualizować wartości prawdopodobieństwa tras na podstawie śladów feromonów, co zwiększa obciążenie obliczeniowe węzłów (szczególnie w dużych sieciach). Podobnie, w przypadku algorytmu pszczelego, każdy węzeł typu NODE musi przetwarzać informacje od innych węzłów (tj. pszczół) oraz obliczać atrakcyjność różnych tras, co również obciąża zasoby obliczeniowe pojedynczego węzła. W obydwu algorytmach węzły muszą przechowywać informacje o wielu trasach, feromonach (ACO) lub źródłach pożywienia (BEE), co wymaga dużych zasobów dostępnej pamięci. Proste mikrokontrolery, w szczególności jednostki zasilane bateryjnie stosowane w węzłach typu NODE, cechują się ograniczonymi zasobami pamięci stanowiącymi istotny problem przy dużej liczbie węzłów i skomplikowanych obliczeniach. Dlatego w dalszych badaniach proponuje się zastosować algorytm bazujący na optymalizacji rojem cząstek z wykorzystaniem elementów algorytmu mrówkowego (zgodnie z opisem w rozdziale 4.2). Przeprowadzone badania modelu sieci sensorycznej, stanowią bazę do wykonania badań prototypu sieci składającego się, z co najmniej 30 węzłów,

- we wszystkich funkcjach celu zaimplementowanych algorytmów wprowadzone zostały wagi, które wpływają na optymalizację procesu transmisji danych w sieci zgodnie z odpowiednim kryterium. W związku z wprowadzonym założeniem w następnych etapach pracy (podczas realizacji badań prototypu sieci sensorycznej) należy przeanalizować wpływ doboru wag, na wyniki poszczególnych kryteriów,
- w wyniku przeprowadzonych badań zaproponowano również koncepcję konfiguracji stanowiska badawczego, dzięki któremu było możliwe wykonanie badań sieci złożonej z większej liczby węzłów (opis stanowiska przedstawiony został w rozdziale 5).

## 6.2. Badania prototypu sieci sensorycznej - sieć z 30 węzłami

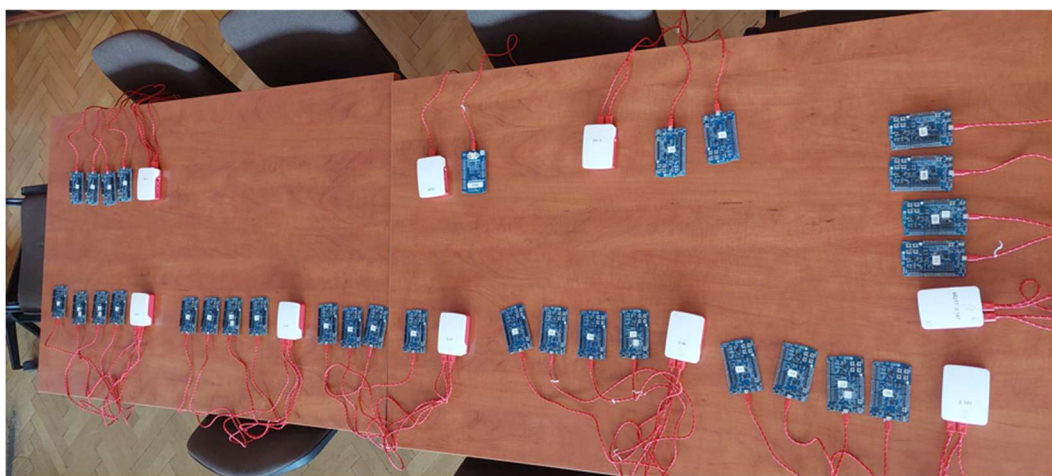
Badania prototypu sieci sensorycznej polegały na walidacji algorytmu trasowania (tożsamego z założeniami przedstawionymi w rozdziale 5.2) zgodnie z metodą określoną w rozdziale 4.2. Na etapie badań przeprowadzono kilka iteracji walidacji opracowanego algorytmu trasowania. W niniejszym rozdziale zebrano najważniejsze wyniki z przebiegu przeprowadzonego procesu walidacji.

Zgodnie z wytycznymi zawartymi w rozdziale 5 zbudowany został prototyp sieci sensorycznej składający się z 30 węzłów sieci (Rys. 60). Badania były przeprowadzone kolejno w sieci składającej się z 5, 10, 20 oraz 30 węzłów. W celu diagnostyki sieci sensorycznej została ona połączona zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 60.



Rys. 60. Widok blokowy struktury prototypowej sieci sensorycznej

Prototyp sieci składał się z 9 komputerów Raspberry Pi (połączonych poprzez bezprzewodową sieć WiFi), którym nadano w routerze adresy IP zgodnie z ich numerami MAC. Do każdego komputera Raspberry Pi podłączono 4 moduły radiowe nRF52 poprzez przewód USB (Rys. 61).



Rys. 61. Widok konfiguracji sprzętowej prototypu sieci sensorycznej - badania węzłów statycznych

Po przeprowadzeniu pierwszych badań algorytmu uzyskano wartości parametrów przedstawione w tabeli 9. W każdym przypadku zarejestrowano parametry przy przesyłaniu 100 oraz 1000 pakietów danych.

Tab. 9. Dane uzyskane w przypadku pojedynczego węzła (informacje PSO przesyłane w ramach połączeniowych)

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 34 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.

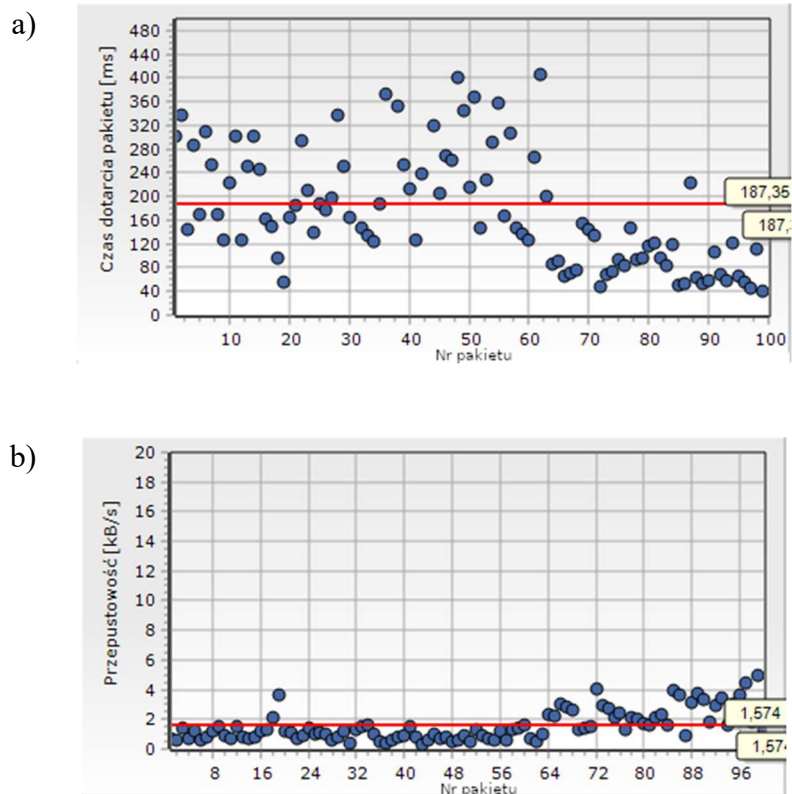
Kolejne iteracje, w których zmodyfikowano sposób wysyłania ramek NODE\_PSO\_INFO oraz SINK\_PSO\_INFO (ramki zostały wysyłane jako pakiety reklamowe protokołu Bluetooth, czyli jako ramki przedpołączeniowe), zostały przedstawione w tabeli 10.

Tab. 10. Dane uzyskane w przypadku pojedynczego węzła (informacje PSO przesyłane w ramach przedpołączeniowych, tzw. advertisement)

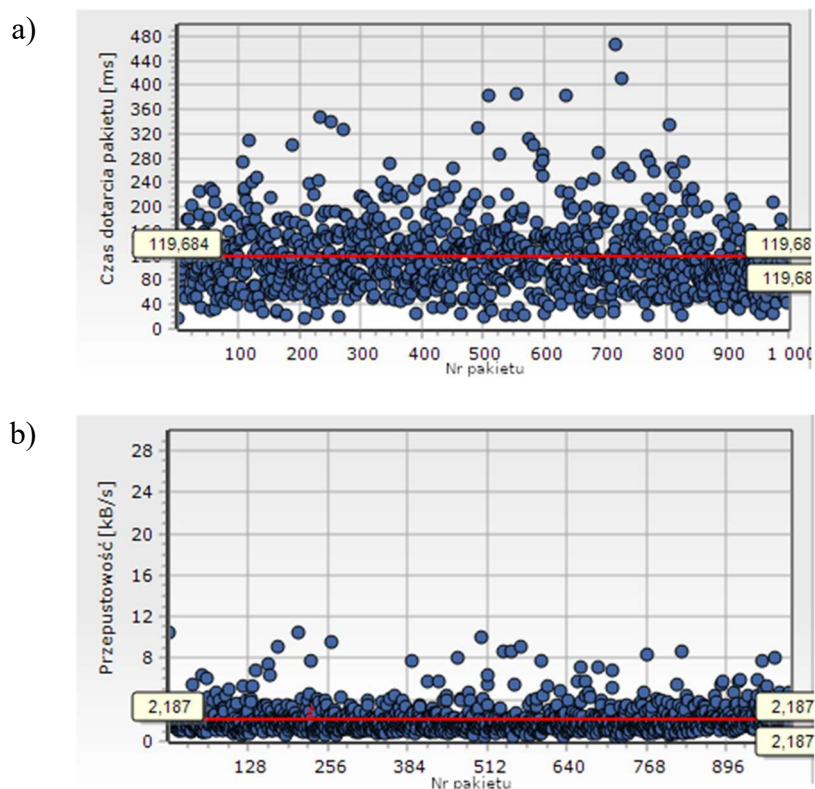
Lp.	Liczba węzłów w sieci sensorycznej	Liczba wysłanych pakietów danych	Czas dotarcia pakietu do miejsca docelowego [ms]	Pewność dostarczenia danych do odbiorcy PDR [%]	Przepustowość BDR [kB/s]
1	5	100	46	94	5,3
2	5	1000	48	93	5,2
3	10	100	187	99	1,6
4	10	1000	151	94	1,6
5	20	100	199	96	3,1
6	20	1000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

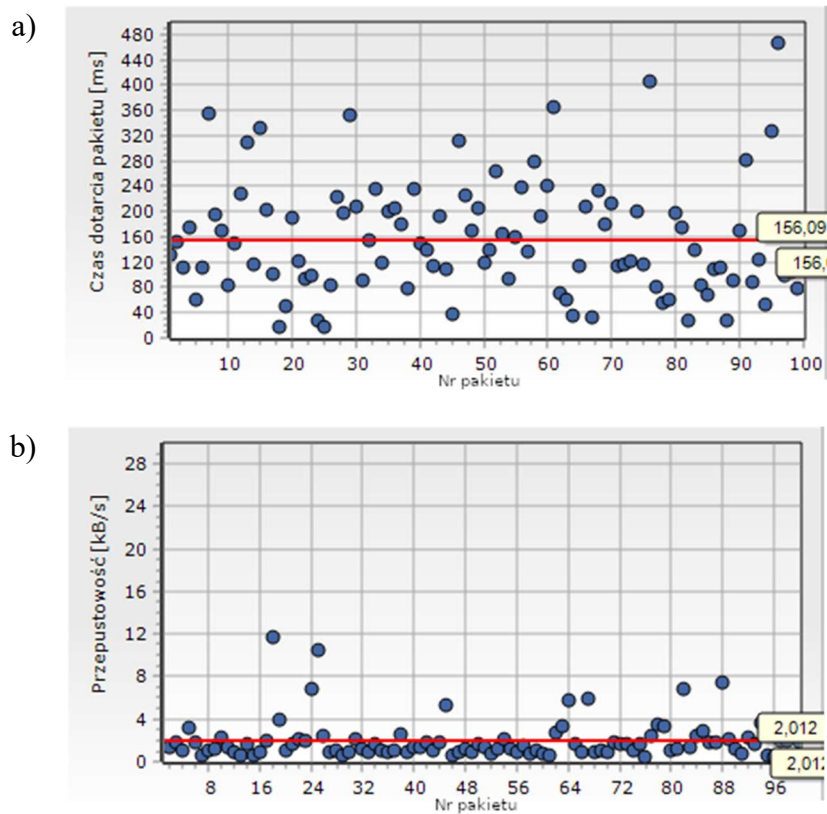
Na rysunkach 62-65 przedstawiono wybrane charakterystyki (czas dotarcia pakietów oraz przepustowość) uzyskane podczas walidacji prototypu sieci sensorycznej przy 100 oraz 1000 wysłanych pakietów.



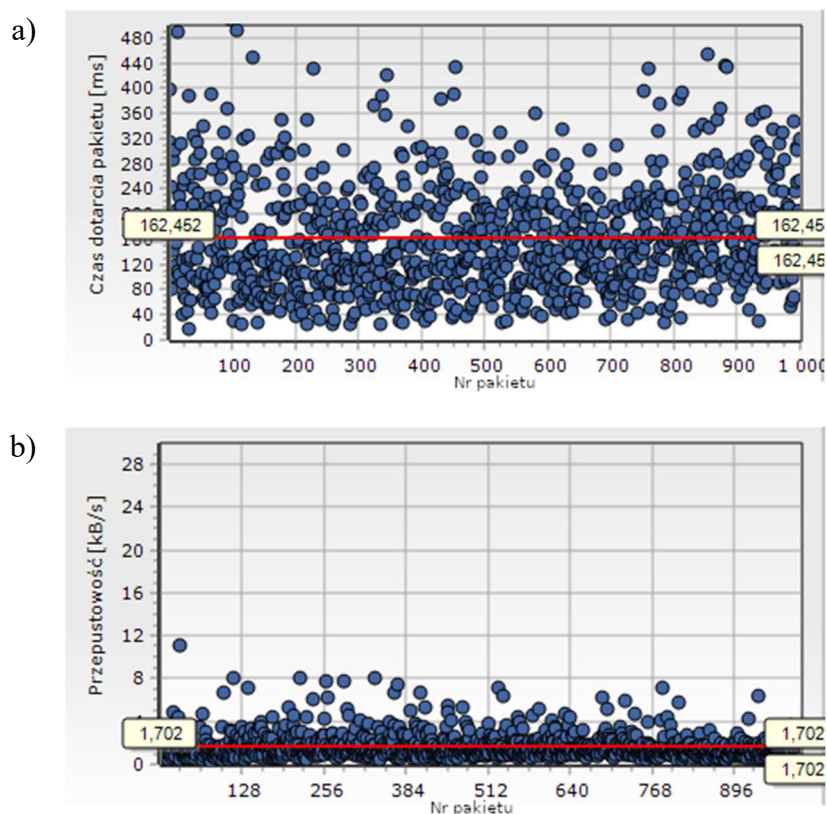
Rys. 62. Charakterystyki zarejestrowane przy wysłaniu 100 pakietów w prototypowej sieci sensorycznej z 10 węzłami:  
a) czasu dotarcia pakietu do miejsca docelowego, b) przepustowości



Rys. 63. Charakterystyki zarejestrowane przy wysłaniu 1000 pakietów w prototypowej sieci sensorycznej z 20 węzłami:  
a) czasu dotarcia pakietu do miejsca docelowego, b) przepustowości



Rys. 64. Charakterystyki zarejestrowane przy wysłaniu 100 pakietów w prototypowej sieci sensorycznej z 30 węzłami:  
 a) czasu dotarcia pakietu do miejsca docelowego, b) przepustowości

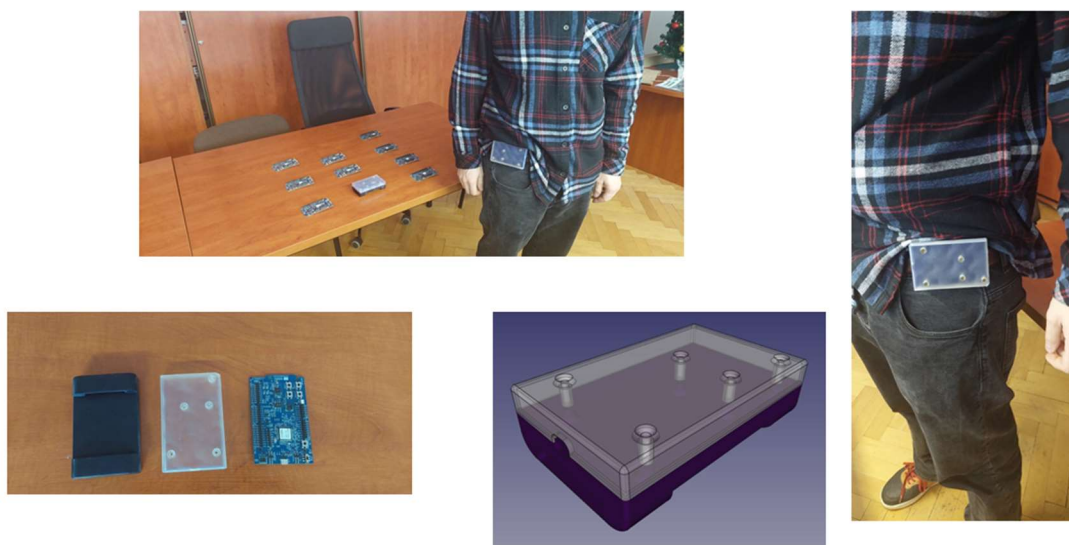


Rys. 65. Charakterystyki zarejestrowane przy wysłaniu 1000 pakietów w prototypowej sieci sensorycznej z 30 węzłami:  
 a) czasu dotarcia pakietu do miejsca docelowego, b) przepustowości



W sieci 30 węzłowej konfiguracja sieci (realizowane połączenia pomiędzy poszczególnymi węzłami) zmieniała się wielokrotnie. Uśredniony czas dostarczenia pakietów całej sieci wzrasta wraz ze zwiększeniem liczby węzłów.

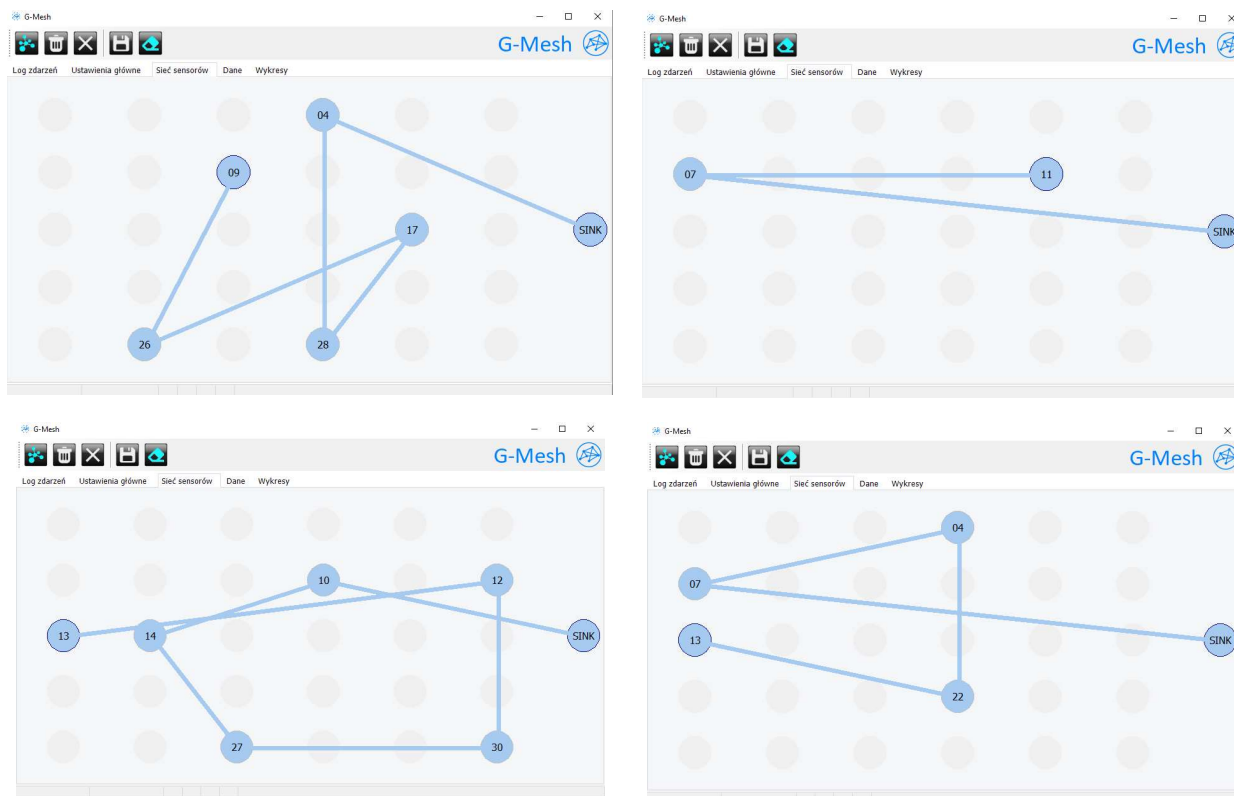
Przeprowadzono również badania procesu rekonfiguracji sieci, analizując jej zachowanie w przypadku uszkodzenia pojedynczego węzła lub dodania nowego. Czas rekonfiguracji sieci wynosił 10-20 sekund, po czym sieć adaptowała się do zmian w strukturze bez wykazywania błędów działania. Dodatkowo, w celu weryfikacji stabilności transmisji danych w przypadku ruchomych węzłów, opracowano obudowę modułów nRF52, umożliwiającą ich umieszczenie na pasku osoby przemieszczającej się w przestrzeni (Rys. 66).



Rys. 66. Widok obudowy węzła prototypowej sieci sensorycznej do badań ruchomych węzłów

Podczas testów potwierdzono również prawidłowe funkcjonowanie sieci z ruchomymi węzłami. Informacje z węzłów typu NODE trafiały do węzła docelowego (SINK) przy zachowaniu niezmiennych wartości parametrów transmisji danych. Należy jednak zauważyć, że zmiany położenia węzłów nie miały charakteru szybkozmiennego, ponieważ zastosowanie algorytmów trasowania sieci o dynamicznej strukturze nie występuje w proponowanym przypadku implementacji prototypowanego rozwiązania i tym samym nie stanowiło to celu badań. Przeprowadzone testy miały jedynie potwierdzić stabilność transmisji danych w kontekście nieznacznych zmian odległości węzłów sieci, wynikających ze zmiany ich położenia.

Na rysunku 67 zaprezentowano wybrane wyniki pomiarów ścieżek transmisji danych w sieci składającej się z 30 węzłów. Należy zwrócić uwagę, że poszczególne grafiki węzłów nie odpowiadają fizycznym położeniom, a służą jedynie do celów szybkiej interpretacji drogi pakietu danych.



Rys. 67. Przykładowe ścieżki pakietów danych w prototypowej sieci sensorycznej składającej się z 30 węzłów

W wyniku badań zaobserwowano, że pomimo bliskości węzła typu SINK dane były w niektórych przypadkach transmitowane do dalej położonych węzłów typu NODE. W przypadku niewielkich odległości między węzłami (rzędu kilku centymetrów) było to spowodowane określeniem odległości pomiędzy węzłami na podstawie mocy nadawczej sygnału radiowego sąsiada RSSI.

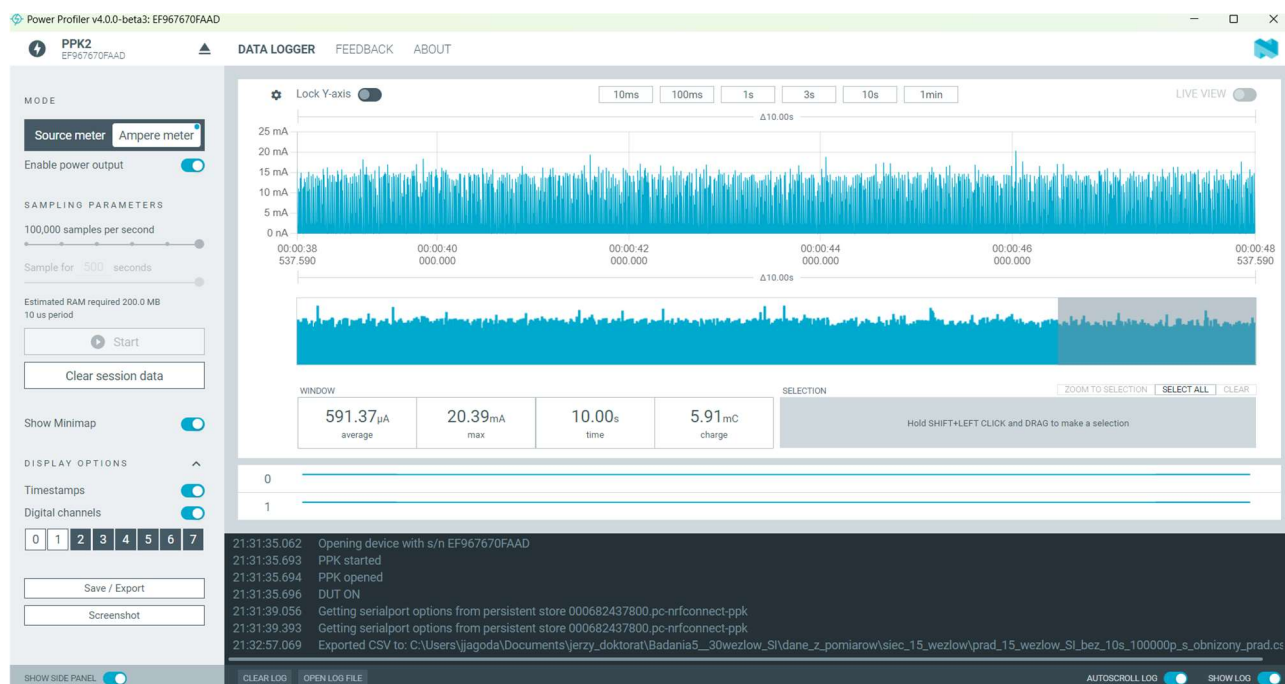
Interpretacja odległości na podstawie RSSI przy bliskich odległościach może być mniej dokładna. Jednak w przypadku bliskiej odległości węzłów, ma to znikomy wpływ na czas dostarczenia pakietu do miejsca docelowego. Jeśli jednak istnieje konieczność określenia odległości z dokładnością do 1 centymetra, konieczne jest zaimplementowanie w węzłach sieci dodatkowych modułów wykorzystujących sygnał radiowy UWB (ang. Ultra Wideband).

Pomiar natężenia prądu w wybranych węzłach sieci nie wykazywał istotnych różnic po zastosowaniu zmodyfikowanego algorytmu. Mierzone wartości zużycia energii poszczególnych węzłów były zbliżone do parametrów obserwowanych w sieci, w której algorytm nie był stosowany. Na zużycie energii w poszczególnych węzłach wpływa głównie czas aktywności w trybie reklamowym (advertisement), jak również dobrany poziom mocy sygnału radiowego RSSI.

Zastosowany algorytm zapobiega jednak drenażowi energetycznemu poszczególnych węzłów. Opisany przypadek może wystąpić, gdy pakiet danych nie dociera do odbiorcy i jest wielokrotnie retransmitowany, co powoduje sukcesywne wyczerpywanie źródła zasilania pojedynczego węzła. Algorytm pozwala na utrzymanie wysokiego poziomu współczynnika PDR, co skutkuje pewnością

dostarczenia danych do odbiorcy bez potrzeby retransmisji. Ma to bezpośredni wpływ na wydłużenie czasu pracy każdego z węzłów przy zasilaniu bateryjnym.

Uśrednioną wartość natężenia prądu poszczególnych węzłów sieci udało się ograniczyć do wartości 0,6 mA, stosując regulację parametru RSSI oraz czasu trwania procesu reklamowego (Rys. 68).



Rys. 68. Charakterystyka zużycia energii przez pojedynczy węzeł sieci typu NODE

W miarę zwiększania liczby węzłów, zaobserwowano spadek przepustowości i wzrost czasu wymaganego do dostarczania pakietów danych, przy stabilizacji przepustowości w przedziale 0,8-2,5 kB/s w sieci z 10, 20 i 30 węzłami. Badania procesu rekonfiguracji sieci wykazały, że czas adaptacji wynosił 10-20 sekund.

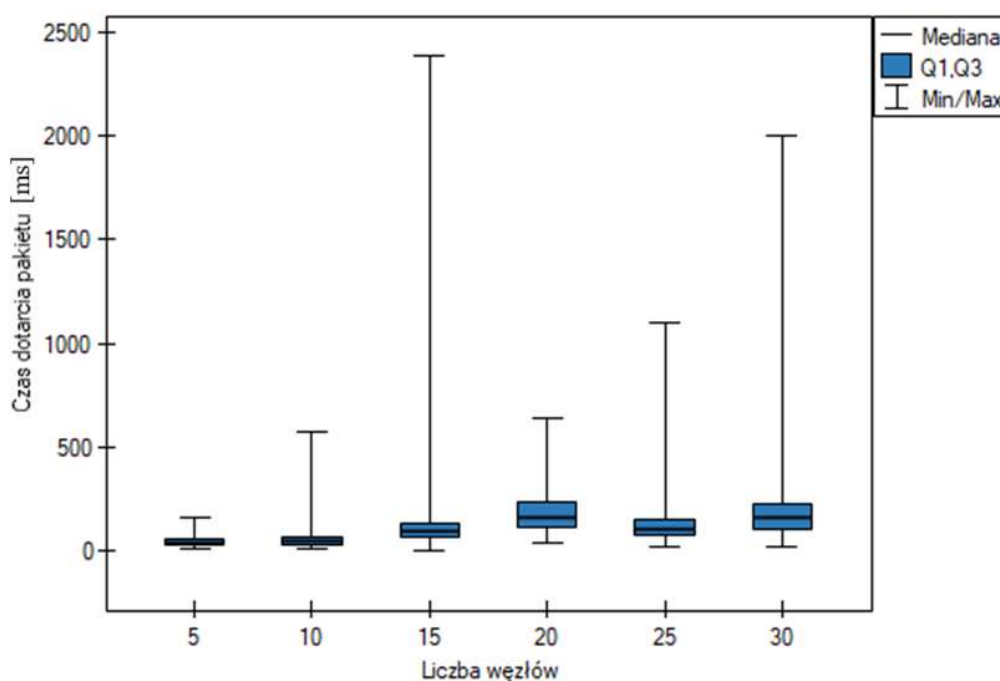
Potwierdzono również prawidłowe działanie sieci z ruchomymi węzłami. Pomiar natężenia prądu nie wykazał istotnych różnic po zastosowaniu opracowanego algorytmu. Jednak w wyniku utrzymywania wysokiego współczynnika PDR udało się zminimalizować zapotrzebowanie energetyczne węzłów sieci, co wydłuża czas pracy węzłów przy zastosowanym zasilaniu bateryjnym.

W następnym rozdziale przedstawiono kompleksową analizę statystyczną zarejestrowanych wartości w przypadku poszczególnych kryteriów.

### 6.3. Analiza statystyczna parametrów sieci

W celu identyfikacji szczegółowej charakterystyki badanego procesu, dane zostały poddane analizie statystycznej przy użyciu programu PQStat. Ze względu na brak normalnego rozkładu zebranych danych pomiarowych, do analizy zastosowano metodę ANOVA Kruskala-Wallisa. Porównano wartości każdego z kryteriów w przypadku następujących grup danych, odpowiednio dla 5, 10, 15, 20, 25 oraz 30 węzłów w sieci sensorycznej.

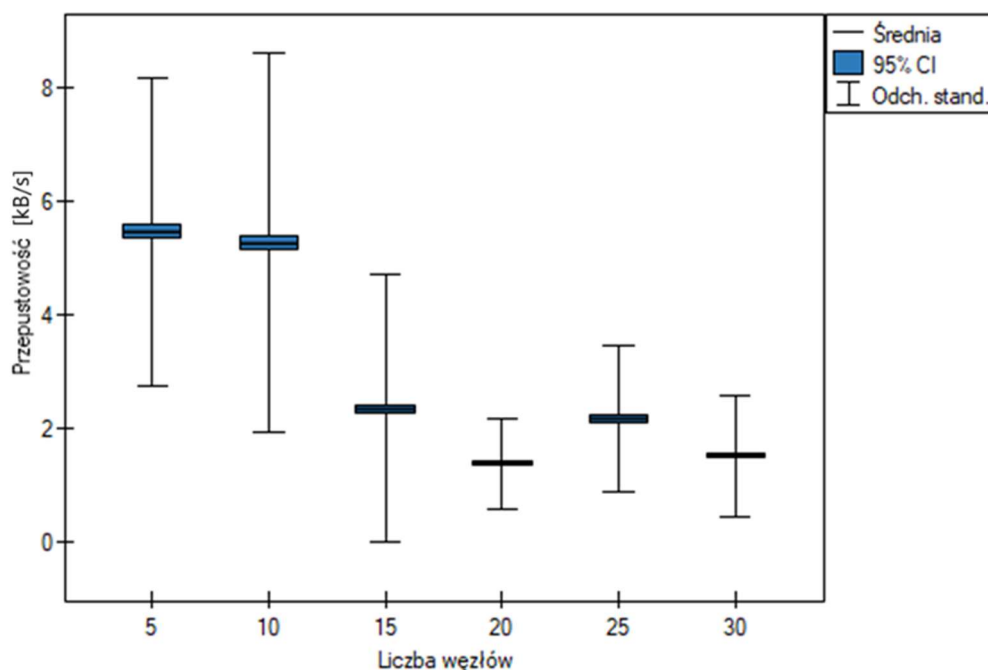
Dane w przypadku poszczególnych konfiguracji sieci prototypowej wykazywały istotne różnice metryk. Analiza potwierdziła wzrost wartości średniej czasu dotarcia pakietu do miejsca docelowego (Rys. 69) wraz ze zwiększeniem liczby węzłów, przy czym wartość ta stabilizuje się na poziomie około 160 ms.



Rys. 69. Analiza czasu dotarcia pakietu do miejsca docelowego sieci sensorycznych o różnej liczbie węzłów wykonana metodą ANOVA Kruskala-Wallisa

Na wykresie (Rys. 69) można zaobserwować występowanie wartości maksymalnych znacznie odbiegających od mediany czasu dotarcia pakietu do miejsca docelowego. Jednak w tym przypadku zarejestrowane zdarzenia mogło mieć miejsce, gdy w trakcie procesu wysyłania pakietu nastąpiła rekonfiguracja sieci.

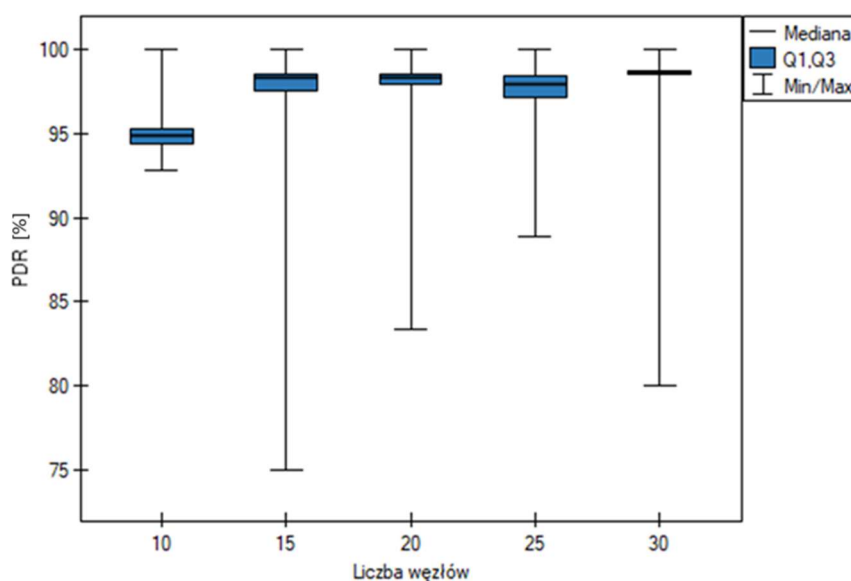
W wyniku analiz można również stwierdzić, że wraz ze wzrostem liczby węzłów sieci sensorycznej przepustowość wyraźnie maleje (Rys. 70).



Rys. 70. Analiza przepustowości sieci sensorycznej o różnej liczbie węzłów wykonana metodą ANOVA Kruskala-Wallisa

Przy małej liczbie węzłów (5 lub 10) przepustowość jest stosunkowo wysoka (6 kB/s). Po przekroczeniu liczby 10 węzłów obserwuje się znaczny spadek przepustowości, która stabilizuje się na najniższym poziomie (około 2 kB/s; przy liczbie węzłów sieci w zakresie od 20 do 30). Odchylenie standardowe i szerokość przedziału ufności rośnie wraz ze wzrostem liczby węzłów. To sugeruje, że przy większej liczbie węzłów sieć staje się mniej stabilna, a przepustowość bardziej zróżnicowana.

Na rysunku 71 przedstawiono analizę współczynnik PDR sieci sensorycznej o różnej liczbie węzłów wykonana metodą ANOVA Kruskala-Wallisa.



Rys. 71. Analiza współczynnik PDR sieci sensorycznej o różnej liczbie węzłów wykonana metodą ANOVA Kruskala-Wallisa

Podczas walidacji procesu przesyłania danych pomiarowych zauważono również okresowe spadki wartości współczynnika PDR. Na podstawie analizy danych zarejestrowanych przez węzeł SINK (dotyczących informacji o wybranych sąsiadach węzła typu NODE) zidentyfikowano występowanie zapętleń w sieci, co skutkowało brakiem dostarczenia danych do węzła wyjściowego. Przykład takiej sytuacji został przedstawiony na rysunku 72.

```

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. 72. Przypadek wykrycia zapętleń w sieci

W celu zapobiegania zidentyfikowanej nieprawidłowości w węźle typu SINK wprowadzono ocenę wyznaczonych dróg pakietu danych. W przypadku, gdy pakiet danych nie osiągnął węzła typu SINK wartość zwracana przez funkcję oceny była obniżana. Dzięki opisanej modyfikacji algorytm wyznaczał ścieżki danych wszystkich węzłów NODE docierających do węzła typu SINK.

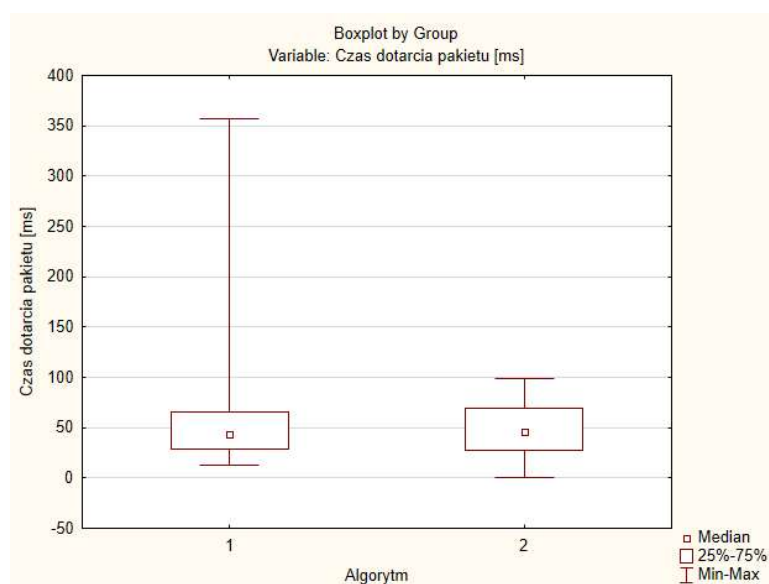
W trakcie badań prowadzono walidację algorytmu pracującego w oparciu o inteligencję roju SI dążąc do uzyskania optymalnych parametrów sieci sensorycznej. Wyniki badań przedstawiono w analizie U Manna-Whitneya, porównując uzyskane rezultaty z siecią pracującą w oparciu o algorytm pracujący bez zastosowania inteligencji roju SI.

Kolejno przeanalizowane dane dotyczą porównania czasów dotarcia pakietów, przepustowości oraz współczynnika PDR w przypadku dwóch algorytmów przy pracy sieci kolejno z 5, 10, 15, 20, 25 oraz 30 węzłami. Ponieważ wyniki nie miały charakterystyki rozkładu normalnego, zastosowano odpowiedni przy tego typu danych nieparametryczny test U Manna-Whitneya. Poziom istotności wyników przyjęto na poziomie 0,05. W tablicy 11 przedstawiono porównanie czasów dotarcia pakietu dwóch algorytmów przy sieci składającej się z 5 węzłów.

Tab. 11. 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)

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
<b>Test U Manna-Whitneya: Z = 0,272; p = 0,785</b>		
<b>Brak istotności</b>		

Test U Manna-Whitneya wykazał (Rys. 73), że różnice w czasach dotarcia pakietów między algorytmem bez SI oraz z SI nie są statystycznie istotne. Oznacza to, że na podstawie dostępnych danych nie można stwierdzić, że jeden z testowanych algorytmów jest znacząco lepszy od drugiego pod względem wartości średniego czasu dotarcia pakietu. Algorytm z SI cechuje się jednak niższą średnią czasu dotarcia pakietu oraz mniejszym odchyleniem standardowym - co sugeruje bardziej spójne czasy dotarcia pakietów. Ponadto, chociaż mediana czasu dostarczenia pakietu jest podobna w obu algorytmach, algorytm z SI charakteryzuje się mniejszą zmiennością i bardziej stabilnymi wynikami, podczas gdy algorytm bez SI ma większy rozrzut i przypadki długiego czasu dostarczenia pakietów.



Rys. 73. Charakterystyka rozkładu danych czasu dotarcia pakietu w sieci zbudowanej z 5 węzłów (gdzie: 1- algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

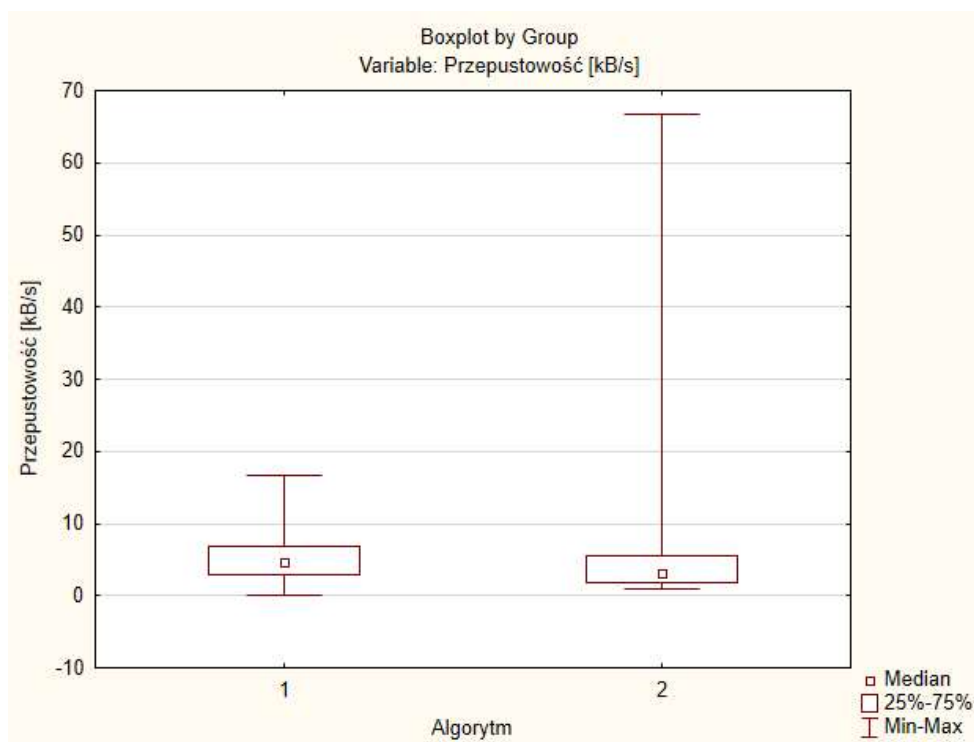
W tablicy 12 zestawiono porównanie przepustowości dwóch analizowanych algorytmów w przypadku badania sieci składającej się z 5 węzłów.

Tab. 12. 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,)

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
<b>Test U Manna-Whitneya: Z = 14,628; p = 0,000</b>		
<b>Istotne statystycznie</b>		

Test U Manna-Whitneya wykazał (Rys. 74), 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. 74. Charakterystyka rozkładu przepustowości sieci zbudowanej z 5 węzłów (gdzie; 1- algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

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



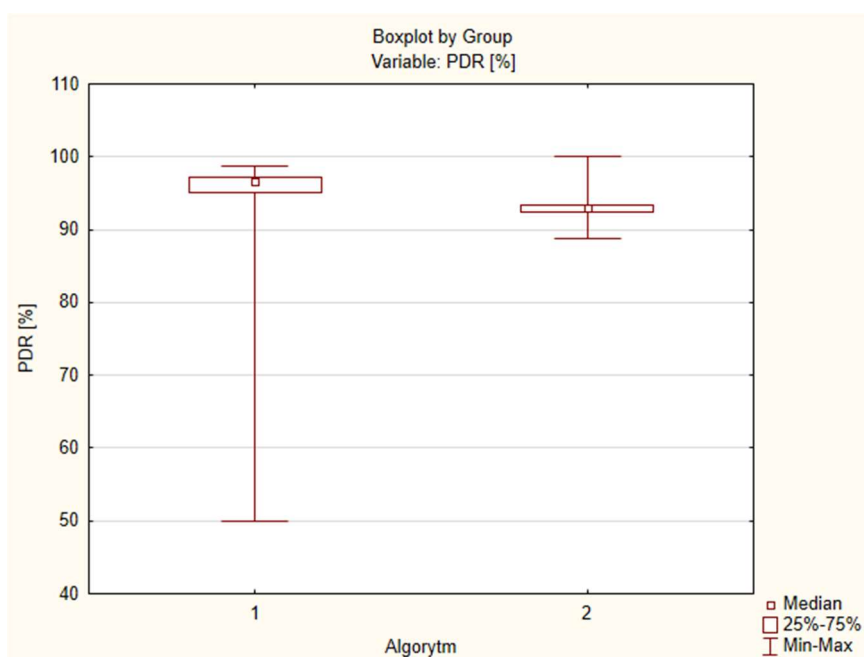
Tab. 13. Porównanie wartości PDR'a dwóch algorytmów w sieci składającej się z 5 węzłów, gdzie: Z – standaryzowana wartość testu Manna-Whitney'a (statystyka testowa), p - prawdopodobieństwo otrzymania takiego (lub bardziej skrajnego) wyniku testu jak został zaobserwowany, przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa (prawdopodobieństwo testowe)

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
<b>Test U Manna-Whitneya: Z = 53,630; p = 0,000</b>		
<b>Istotne statystycznie</b>		

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.



Rys. 75. Charakterystyka rozkładu danych PDR w sieci zbudowanej z 5 węzłów (gdzie: 1- algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

Ponadto, algorytm bez SI wykazuje wyższą medianę PDR (Rys. 75), 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.

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 tablicy 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.

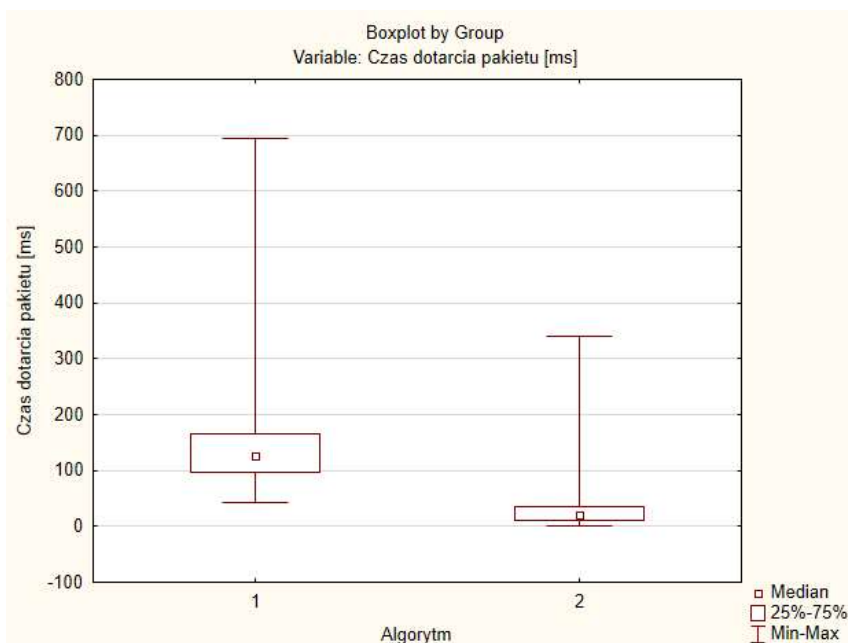
Tab. 14. Porównanie czasów dotarcia pakietu dwóch algorytmów w sieci składającej się z 10 węzłów, gdzie: Z – standaryzowana wartość testu Manna-Whitney’a (statystyka testowa), p - prawdopodobieństwo otrzymania takiego (lub bardziej skrajnego) wyniku testu jak został zaobserwowany, przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa (prawdopodobieństwo testowe)

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
<b>Test U Manna-Whitneya: Z = 31,426; p = 0,000</b>		
<b>Istotne statystycznie</b>		

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. 76). 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.



Rys. 76. Charakterystyka rozkładu danych czasu dotarcia pakietu w sieci zbudowanej z 10 węzłów (gdzie: 1- algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

Następnie wykonano porównanie przepustowości dwóch algorytmów w sieci składającej się z 10 węzłów. W tablicy 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.

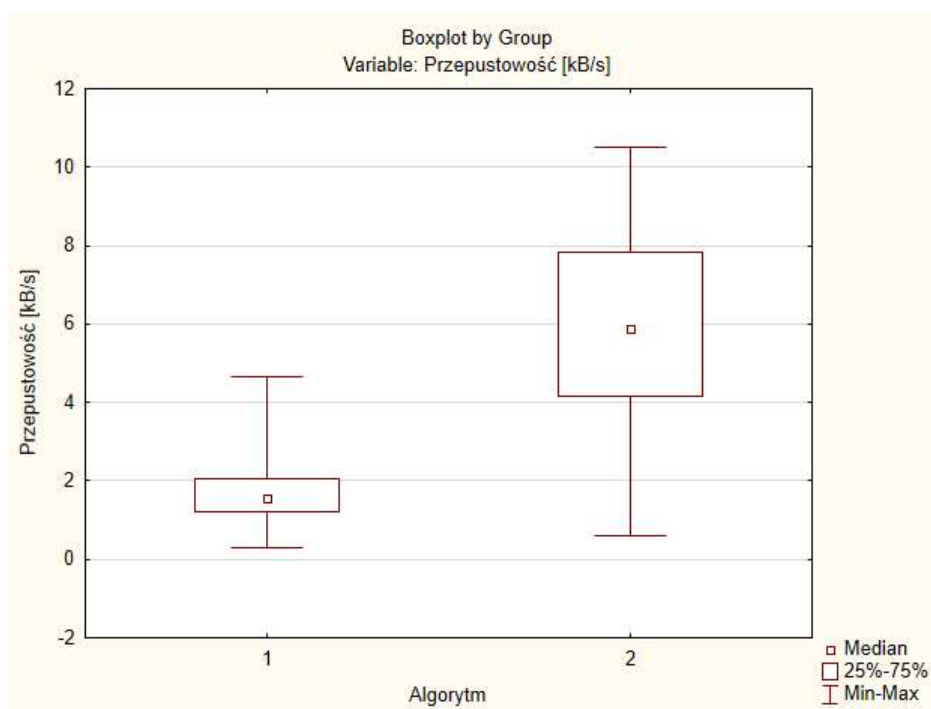
Tab. 15. Porównanie przepustowości dwóch algorytmów w sieci składającej się z 10 węzłów, gdzie: Z – standaryzowana wartość testu Manna-Whitney’a (statystyka testowa), p - prawdopodobieństwo otrzymania takiego (lub bardziej skrajnego) wyniku testu jak został zaobserwowany, przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa (prawdopodobieństwo testowe)

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

Odchylenie standardowe w przypadku algorytmu bez SI wyniosło 0,655, co sugeruje mniejszą zmienność wyników w porównaniu do algorytmu z SI (w przypadku, którego odchylenie standardowe wyniosło 2,494). Minimalna przepustowość wyniosła 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.

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

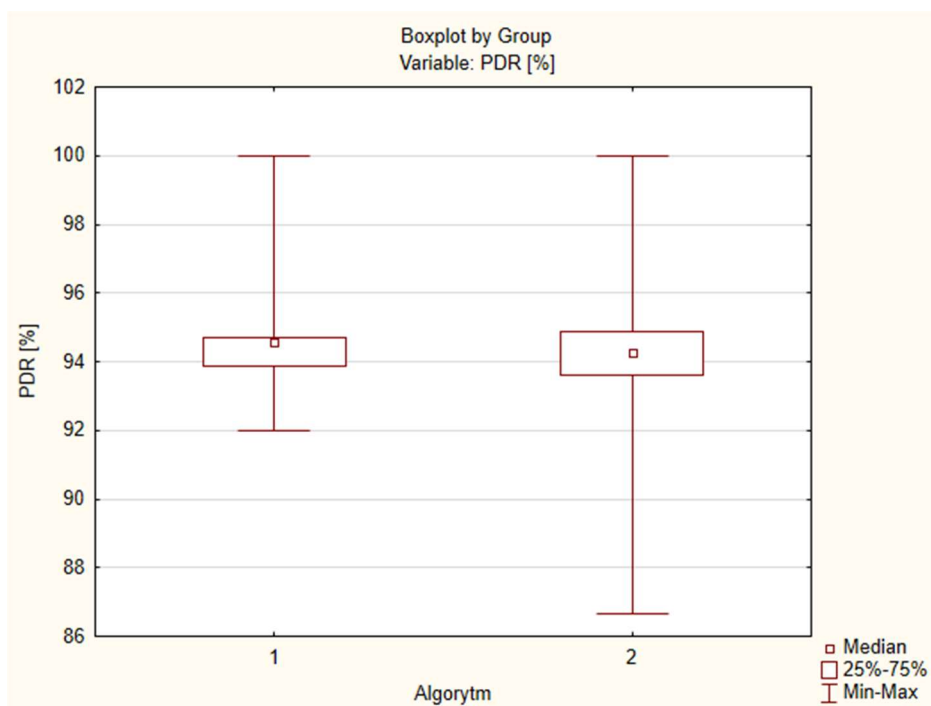
W tabelicy 16 przedstawiono analizę wskaźnika PDR w odniesieniu do dwóch algorytmów w sieci składającej się z 10 węzłów. Dla algorytmu bez SI, średnia wartość PDR wyniosła 94,522%, natomiast dla algorytmu z SI była nieznacznie niższa i wyniosła 94,001%. Odchylenie standardowe w obu przypadkach było zbliżone – 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%.

Tab. 16. 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)

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
<b>Test U Manna-Whitneya: Z = 3,208; p = 0,001</b>		
<b>Istotne statystycznie</b>		

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. 78).



Rys. 78. Charakterystyka rozkładu danych PDR w sieci zbudowanej z 10 węzłów (gdzie: 1 - algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

Kolejny z wykonanych testów (Tab. 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.

Tab. 17. 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)

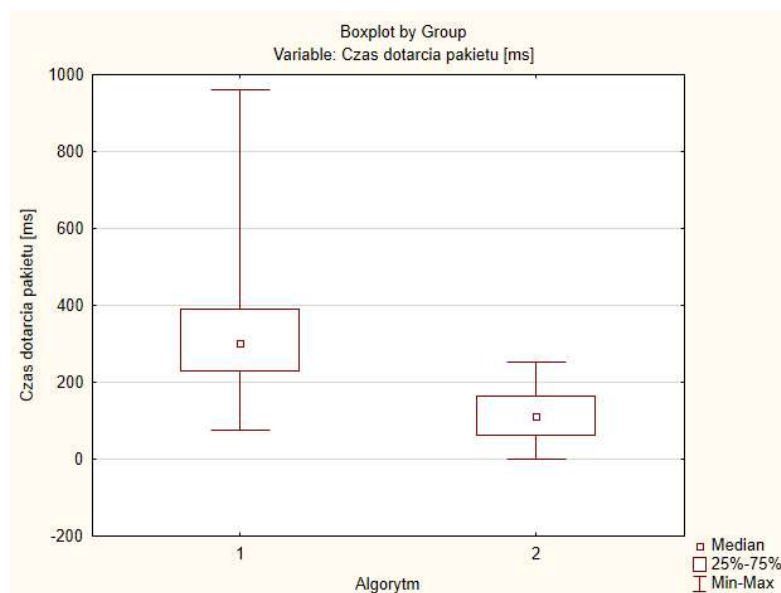
Parametr	Czas dotarcia pakietu - 15 węzłów	
	Algorytm bez SI	Algorytm z SI
Średnia	322,600	114,990
Odchylenie standardowe	130,975	64,659
Wartość min	75	1
Wartość max	960	252
<b>Test U Manna-Whitneya: Z = 52,094 ; p = 0,000</b>		
<b>Istotne statystycznie</b>		

Z rysunku (Rys. 79) wynika, że algorytm z SI zauważalnie przewyższa algorytm bez SI pod względem efektywności, osiągając znacznie niższy 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. 79. Charakterystyka rozkładu danych czasu dotarcia pakietu w sieci zbudowanej z 15 węzłów (gdzie: 1- algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

W tabelicy 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.

Tab. 18. 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)

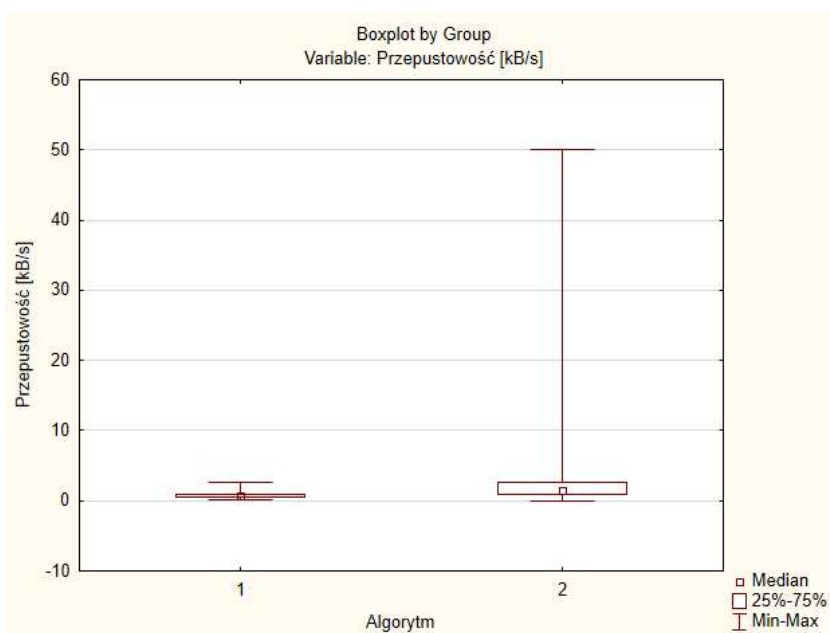
Parametr	Przepustowość - 15 węzłów	
	Algorytm bez SI	Algorytm z SI
Średnia	0,727	3,129
Odchylenie standardowe	0,308	5,499
Wartość min	0,208	0,004
Wartość max	2,667	50
<b>Test U Manna-Whitneya: Z = -42,446; p = 0,000</b>		
<b>Istotne statystycznie</b>		

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 80 wynika, że zakres 25%-75% (ang. Interquartile Range) jest bardzo mały, 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. 80. Charakterystyka rozkładu danych przepustowości w sieci zbudowanej z 15 węzłów (gdzie: 1- algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

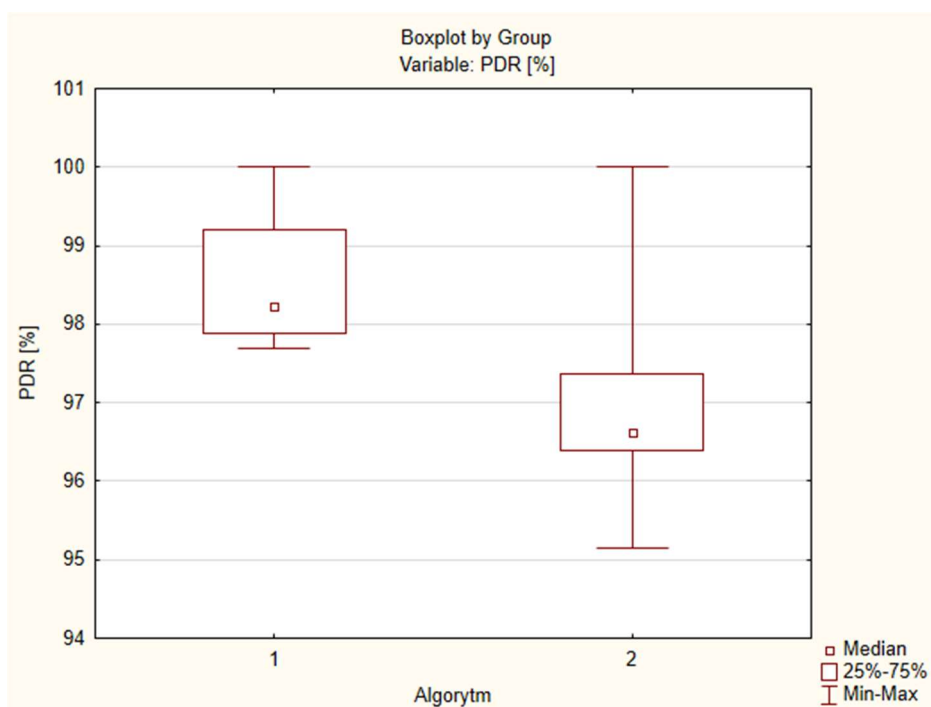


W tablicy 19 przedstawiono porównanie wskaźnika PDR w przypadku dwóch algorytmów w sieci składającej się z 15 węzłów. Dla algorytmu bez zastosowania inteligencji roju (SI) średnia wartość PDR wyniosła 98,661%, natomiast dla algorytmu z SI była nieco niższa i wyniosła 96,977%. Odchylenie standardowe było 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%.

Tab. 19. 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)

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

W sieci składającej się z 15 węzłów (Rys. 81) 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. 81. Charakterystyka rozkładu danych PDR w sieci zbudowanej z 15 węzłów (gdzie: 1- algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

W tabelicy 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 wyniósł 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.

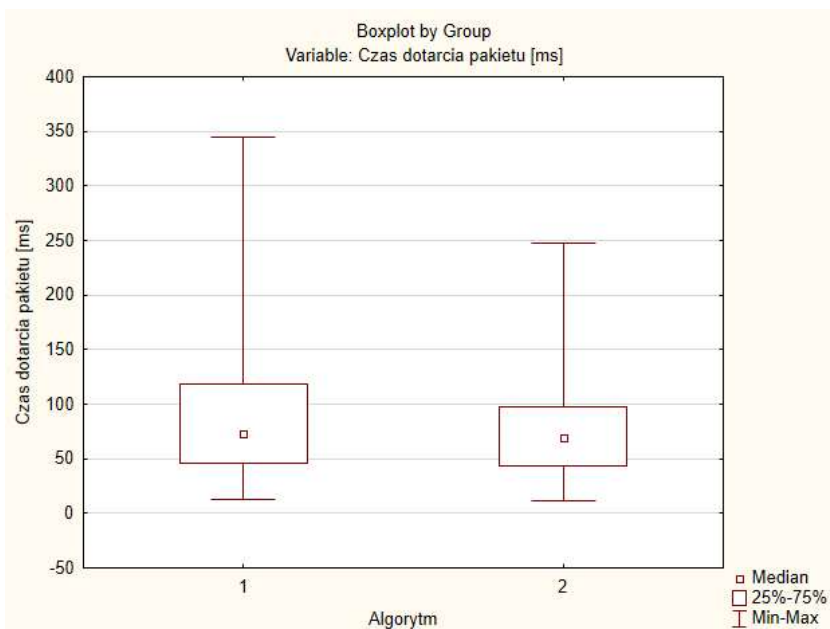
Tab. 20. Porównanie czasów dotarcia pakietu dwóch algorytmów w sieci składającej się z 20 węzłów, gdzie: Z – standaryzowana wartość testu Manna-Whitney’a (statystyka testowa), p - prawdopodobieństwo otrzymania takiego (lub bardziej skrajnego) wyniku testu jak został zaobserwowany, przy założeniu, że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

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
<b>Test U Manna-Whitneya: Z = 4,018; p = 0,000</b>		
<b>Istotne statystycznie</b>		

Wyniki analizy pokazują (Rys. 82), 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. 82. Charakterystyka rozkładu czasu dotarcia pakietu w sieci zbudowanej z 20 węzłów (gdzie: 1- algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

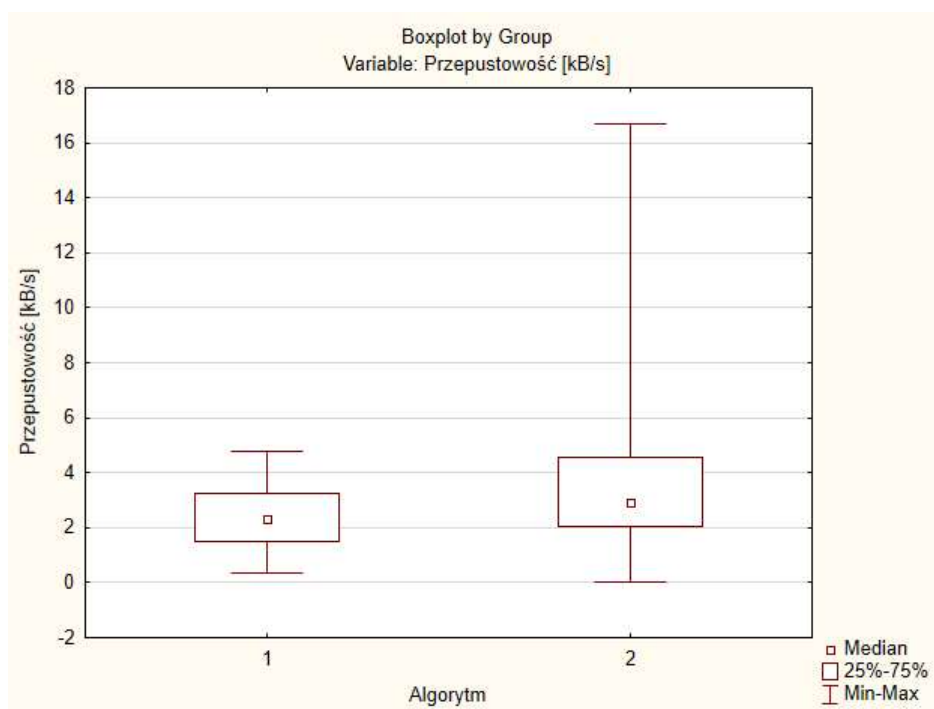
W tabelicy 21 przedstawiono porównanie przepustowości dwóch algorytmów w sieci składającej się z 20 węzłów. Średnia przepustowość dla algorytmu bez zastosowania inteligencji roju (SI) wyniosła 3,771 kB/s, podczas gdy dla algorytmu z SI była nieznacznie niższa i wyniosła 3,688

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.

Tab. 21. 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)

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
<b>Test U Manna-Whitneya: Z = -13,414; p = 0,000</b>		
<b>Istotne statystycznie</b>		

Analiza wyników wykazała (Rys. 83), 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. 83. 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 tablicy 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%.

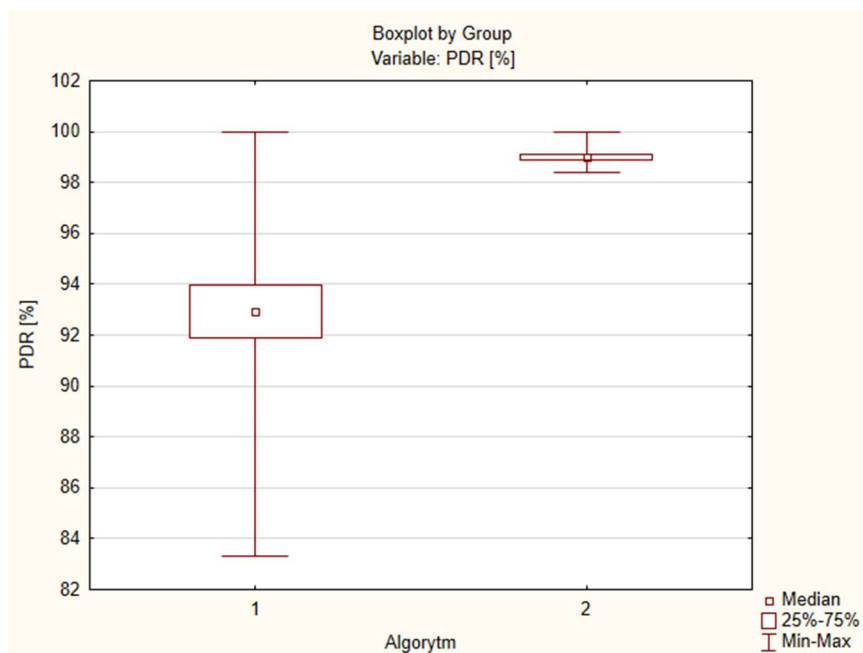
Odchylenie standardowe było wyższe w przypadku algorytmu bez SI (1,360), podczas gdy dla algorytmu z SI odchylenie standardowe wyniosło 0,252. Minimalne wartości PDR wyniosły odpowiednio 83,33% dla algorytmu bez SI oraz 98,39% dla algorytmu z SI, natomiast maksymalne wartości w obu przypadkach wyniosły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

Tab.22. 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)

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
<b>Test U Manna-Whitneya: Z = -48,930; p = 0,000</b>		
<b>Istotne statystycznie</b>		

Algorytm z zastosowaniem SI prezentuje (Rys. 84) 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. 84. Charakterystyka rozkładu danych PDR w sieci zbudowanej z 20 węzłów (gdzie: 1- algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

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

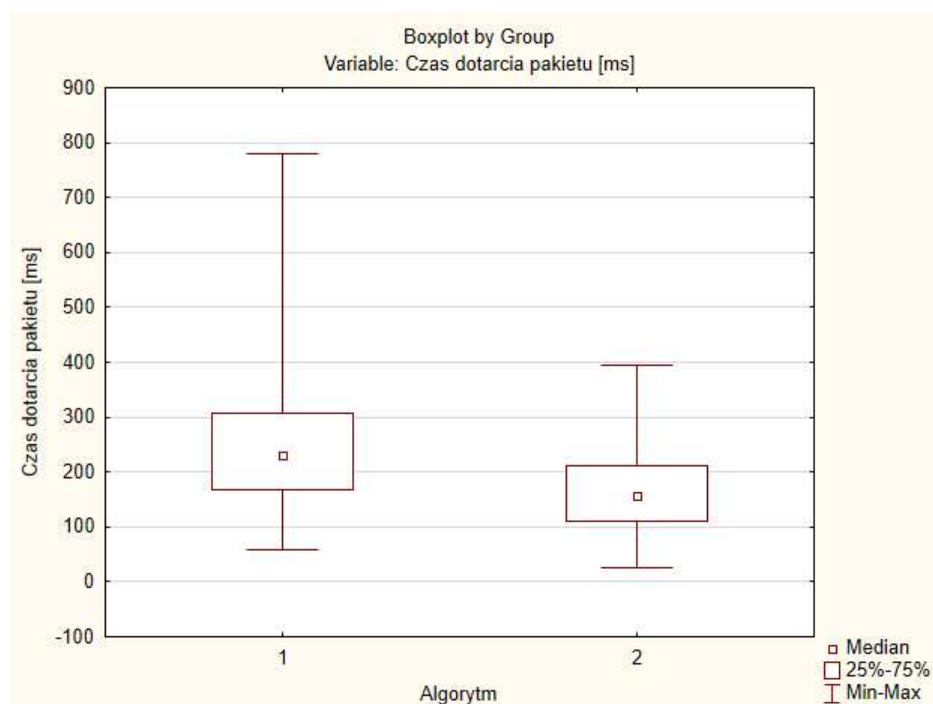
Tab. 23. Porównanie czasów dotarcia pakietu dwóch algorytmów w sieci składającej się z 25 węzłów, gdzie: Z – standaryzowana wartość testu Manna-Whitney’a (statystyka testowa), p - prawdopodobieństwo otrzymania takiego (lub bardziej skrajnego) wyniku testu jak został zaobserwowany, przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa (prawdopodobieństwo testowe)

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
<b>Test U Manna-Whitneya: Z = 23,697 ; p = 0,000</b>		
<b>Istotne statystycznie</b>		

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. 85) znacząco niższy 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. 85. Charakterystyka rozkładu czasu dotarcia pakietów w sieci zbudowanej z 25 węzłów

W tabelicy 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.

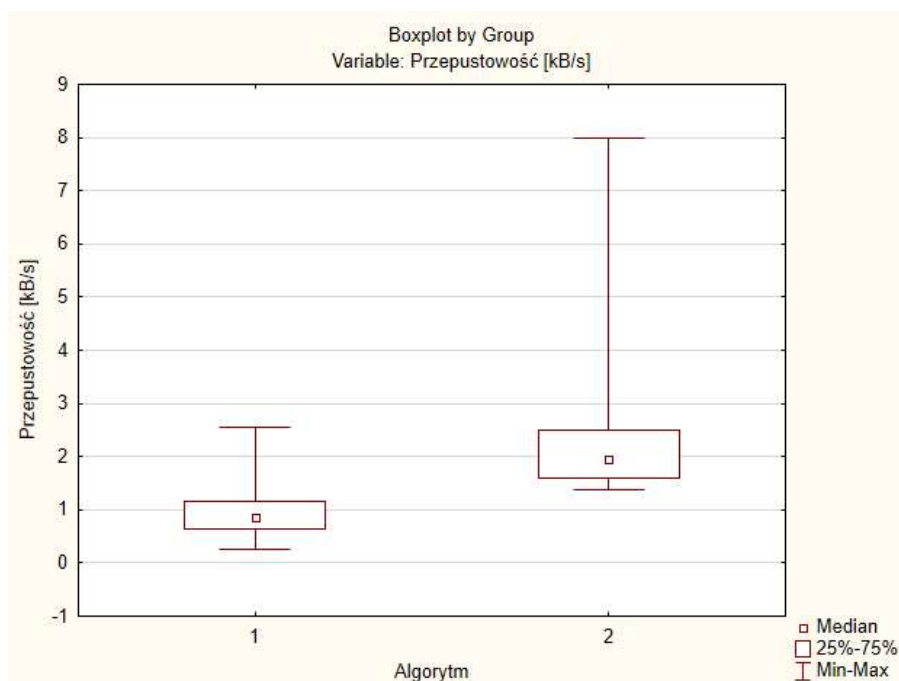
Odchylenie standardowe dla algorytmu bez SI wyniosło 0,423 a dla algorytmu z SI, gdzie odchylenie standardowe wyniosło 0,896. Minimalne wartości przepustowości wyniosły odpowiednio 0,257 kB/s dla algorytmu bez SI oraz 1,389 kB/s dla algorytmu z SI, natomiast maksymalne wartości wyniosły odpowiednio 2,564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

Tab. 24. 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)

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
<b>Test U Manna-Whitneya: Z = -40,674; p = 0,000</b>		
<b>Istotne statystycznie</b>		

W sieci składającej się z 25 węzłów algorytm z SI osiąga (Rys. 86) 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.

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.



Rys. 86. Charakterystyka rozkładu danych przepustowości w sieci zbudowanej z 25 węzłów



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.

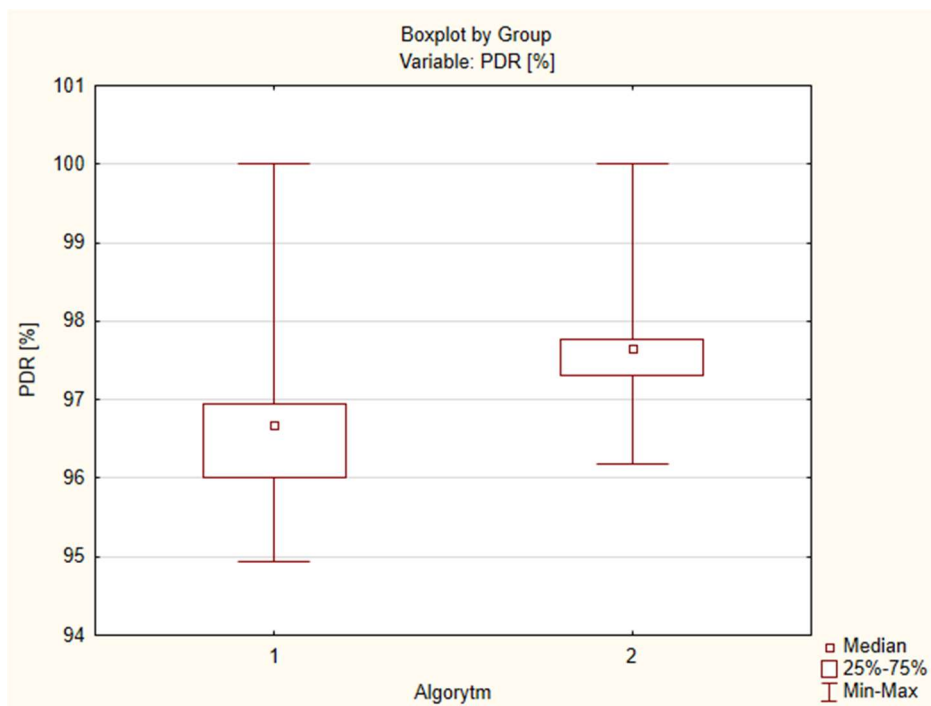
W tablicy 25 przedstawiono porównanie wskaźnika PDR dla dwóch algorytmów w sieci składającej się z 25 węzłów. Dla algorytmu bez zastosowania inteligencji roju (SI) średnia wartość PDR wyniosła 96,604%, natomiast dla algorytmu z SI była nieco wyższa i wyniosła 97,669%.

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%.

Tab. 25. 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)

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

Algorytm z użyciem inteligencji roju (SI) osiąga (Rys. 87) 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.



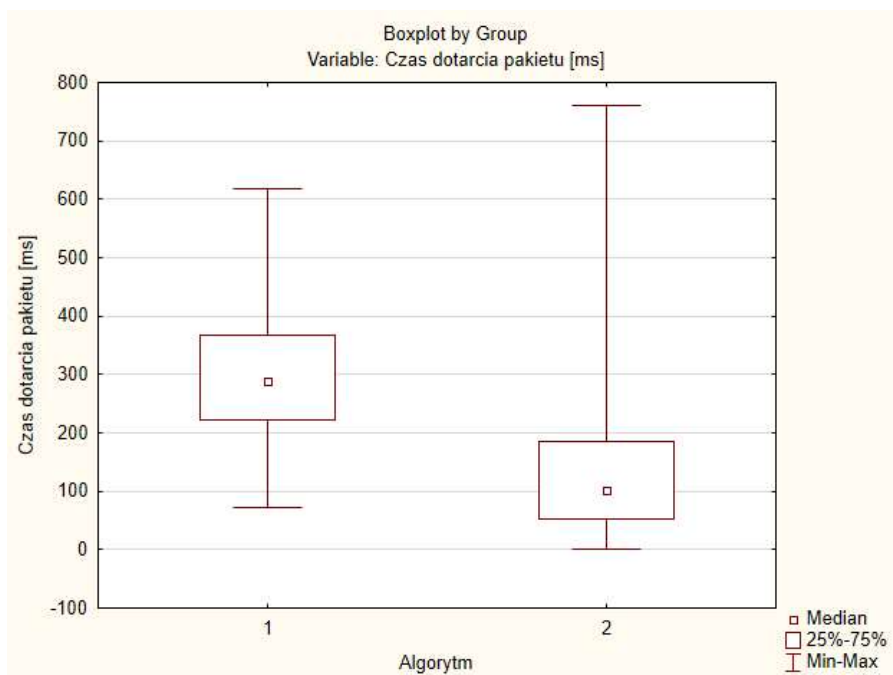
Rys. 87. Charakterystyka rozkładu PDR w sieci zbudowanej z 25 węzłów (gdzie: 1- algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

W tabelicy 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 wyniósł 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.

Tab. 26. 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)

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
<b>Test U Manna-Whitneya: Z = 61,891; p = 0,000</b>		
<b>Istotne statystycznie</b>		

Porównanie czasu dotarcia pakietu w sieci składającej się z 30 węzłów w przypadku dwóch algorytmów wykazało (Rys. 88), 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.



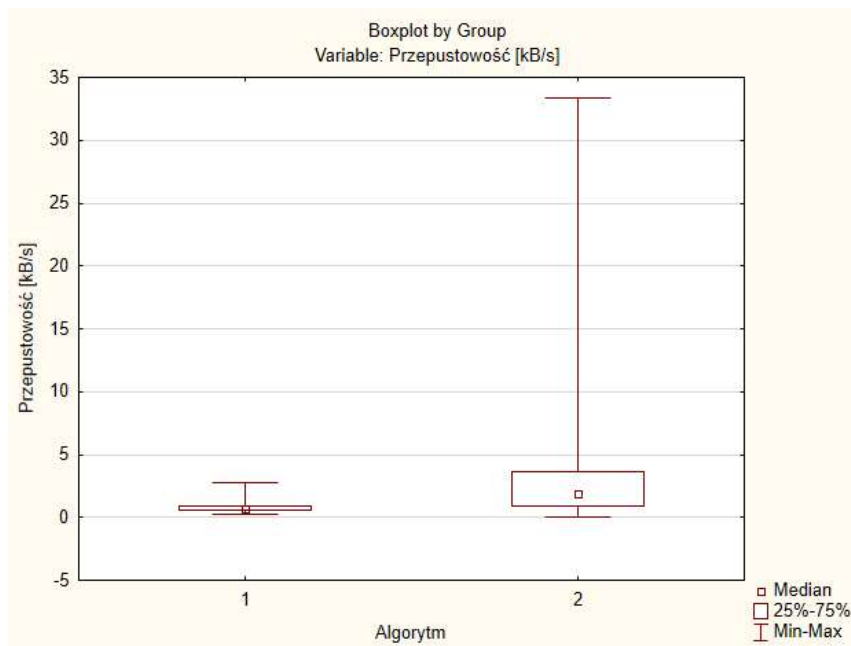
Rys. 88. Charakterystyka rozkładu czasu dotarcia pakietu w sieci zbudowanej z 30 węzłów (gdzie; 1- algorytm bez SI, 2 - algorytm z SI)

W tabelicy 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.

Tab. 27. 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)

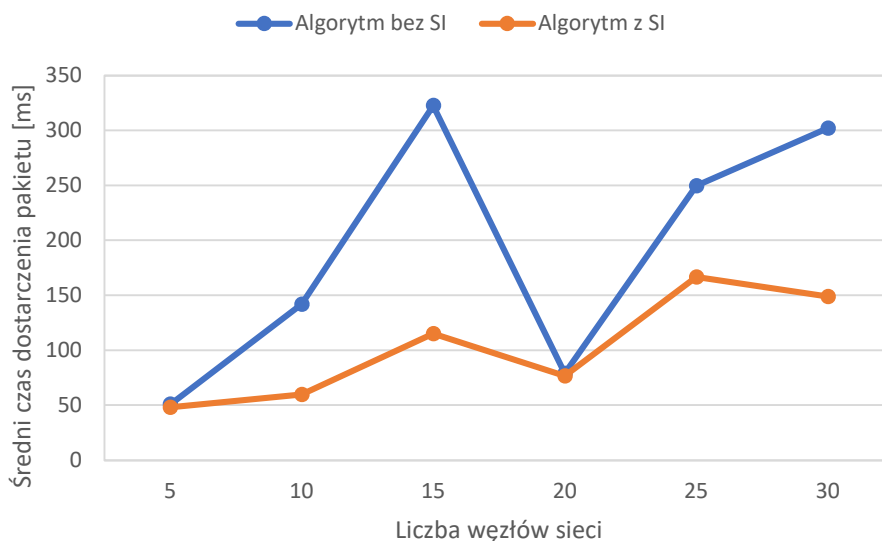
Parametr	Przepustowość – 30 węzłów	
	Algorytm bez SI	Algorytm z SI
Średnia	0,748	3,090
Odchylenie standardowe	0,298	4,029
Wartość min	0,199	0,004
Wartość max	2,778	33,333
<b>Test U Manna-Whitneya: Z = -54,216; p = 0,000</b>		
<b>Istotne statystycznie</b>		

Średnia wartość przepustowości w sieci składającej się z 30 węzłów (Rys. 89) 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 osiągania 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. 89. Charakterystyka rozkładu przepustowości w sieci zbudowanej z 30 węzłów

Podczas ostatniego etapu analizy zestawiono uśrednione wartości czasu dostarczenia pakietu do miejsca docelowego, przepustowość oraz wartość współczynnika PDR porównując algorytmy pod względem reakcji na zmianę liczby węzłów w sieci. Na rysunku Rys. 90 przedstawiono średni czas dostarczenia pakietu danych dla dwóch algorytmów w zależności od liczby węzłów w sieci. Wykres ilustruje, jak zmienia się średni czas dotarcia pakietów w miarę zwiększania liczby węzłów w sieci, porównując algorytm z zastosowaniem inteligencji roju (SI) z algorytmem bez SI.

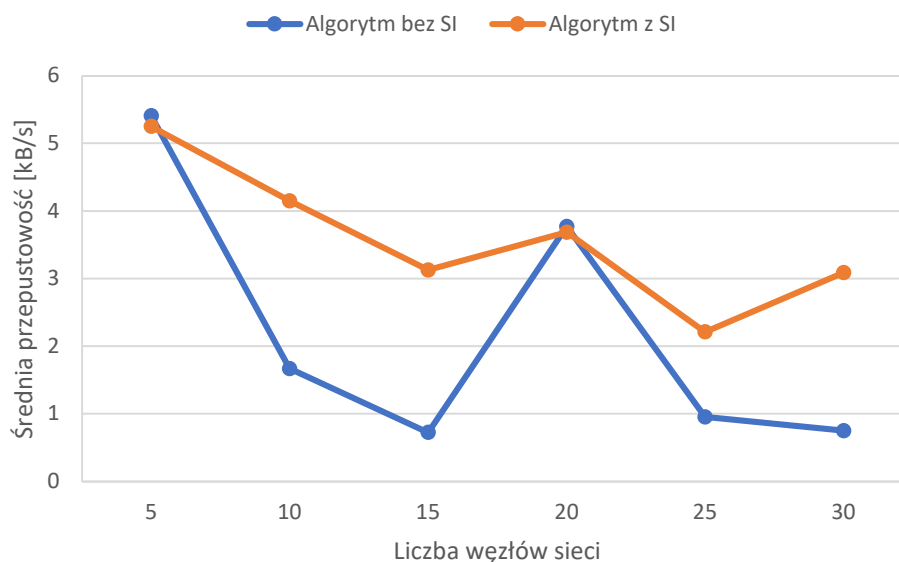


Rys. 90. Średni czas dostarczenia pakietu danych dwóch algorytmów w zależności od liczby węzłów sieci

Opracowany algorytm w porównaniu z algorytmem bez użycia SI pozwala na zmniejszenie wzrostu czasu dotarcia pakietu do miejsca docelowego (w sieciach składających się z 25 i więcej

węzłów). Dodatkowo algorytm stabilizuje wartość czasu dotarcia pakietów danych na poziomie 150 [ms].

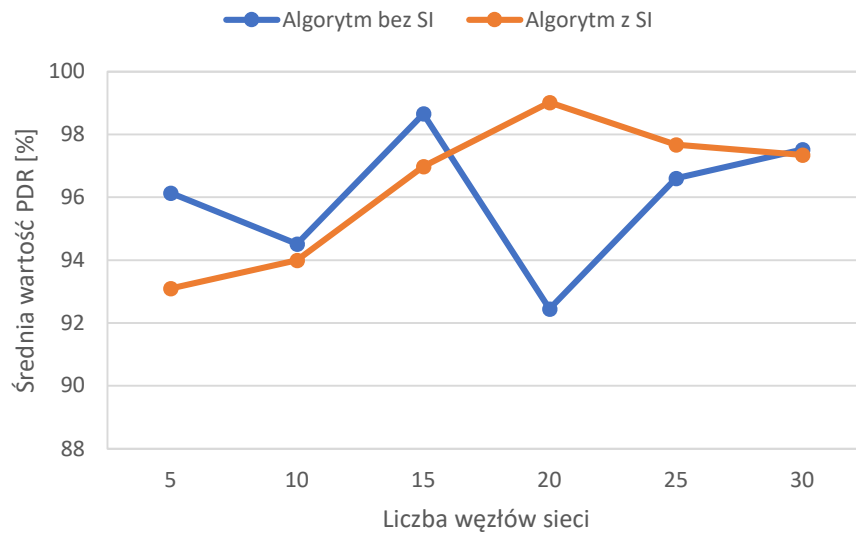
Rysunek 91 przedstawia średnią wartość przepustowości dwóch algorytmów w zależności od liczby węzłów sieci. Można zauważyć, że algorytm z SI sumarycznie osiąga lepsze wyniki pod względem przepustowości w porównaniu do algorytmu bez SI.



Rys. 91. Średnia wartość przepustowości dwóch algorytmów w zależności od liczby węzłów sieci

Opracowany algorytm pozwala również na zwiększenie przepustowości danych w sieci (w porównaniu z algorytmem bez SI). W sieci składającej się z 30 węzłów średnia wartość przepustowości wynosi 3 kB/s. Dodatkowo wartość przepustowości tego algorytmu jest bardziej stabilna oraz wykazuje mniejsze wahania w różnych konfiguracjach sieci. Chociaż przepustowość spada wraz ze wzrostem liczby węzłów, nie występują znaczne spadki przepustowości jak w przypadku algorytmu bez SI.

Na rysunku 92 przedstawiono średnią wartość wskaźnika PDR dwóch algorytmów (bez wykorzystanie SI oraz z wykorzystaniem SI) w zależności od liczby węzłów sieci. Średnia wartość współczynnika PDR w przypadku obydwu algorytmów utrzymuje się na poziomie powyżej 90%. Wartość PDR w przypadku algorytmu z SI wykazuje większą stabilność oraz wyższą wartość średnią w porównaniu do algorytmu bez SI. Algorytm ten osiąga wartości powyżej 94% we wszystkich przypadkach, co oznacza większą pewność dostarczania danych do miejsca docelowego. Wartość PDR w przypadku algorytmu bez SI jest niestabilna, z wyraźnymi spadkami (np. przy 10 i 20 węzłach). Oznacza to, że algorytm bez SI jest mniej pewny w dostarczaniu danych, co może być krytyczne w zastosowaniach wymagających wysokiej niezawodności.



Rys. 92. Średnia wartość wskaźnika PDR dwóch algorytmów w zależności od liczby węzłów sieci

Podsumowanie przeprowadzonych badań obejmuje analizę efektywności algorytmu trasowania w sieci sensorycznej przy różnych liczbach węzłów (5, 10, 15, 20, 25, 30). Analizy wykazały, że algorytm z zastosowaniem inteligencji roju (SI) znacząco poprawia czas dotarcia pakietów, przepustowość oraz wskaźnik dostarczenia pakietów (PDR) w porównaniu do tradycyjnego algorytmu. Algorytm z SI umożliwia również stabilizację czasu dotarcia pakietów na poziomie około 150 ms (przy 25 i więcej węzłach), zwiększenie przepustowości do 3 kB/s (w sieci 30-węzłowej) oraz utrzymanie PDR powyżej 94%. Wyniki testu U Manna-Whitneya potwierdziły statystycznie istotne różnice na korzyść algorytmu z SI, co świadczy o jego przewadze w zarządzaniu siecią sensoryczną.

## 7. Analiza wykonalności węzłów sieci sensorycznej zgodnie z wymaganiami dyrektywy 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 [79] określa zasady stosowania produktów w przestrzeniach zagrożonych wybuchem i jest obowiązująca we wszystkich krajach 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 związku z tym wyodrębniono normy zharmonizowane, których wymagania muszą spełniać projektowane urządzenia, w postaci:

- PN-EN 60079-0:2013-03 + A11:2014-03 - Atmosfery wybuchowe (Część 0: Urządzenia - Podstawowe wymagania),
- PN-EN 60079-11: 2012 - 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 technicznych dotyczących wymagań w zakresie pracy urządzeń i maszyn stosowanych w podziemnych zakładach górniczych.

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 roku (Dziennik Ustaw – poz. 1118, 2017), dotyczącym szczegółowych wymagań w zakresie prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych, w zakładzie górniczym muszą być stosowane maszyny, urządzenia, materiały, środki i substancje chemiczne, wyroby z tworzyw sztucznych oraz środki i sprzęt strzałowy odpowiednio dobrane do warunków geologiczno-górniczych 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 1710+A1 oraz testem płomieniowym zgodnym z EN ISO 340. Podczas



testu czas przyłożenia płomienia wynosi 10 sekund, a czas palenia po jego usunięciu nie może przekraczać 15 sekund,

- **antyelektrostatyczność** - zgodnie z normą EN 60079-0, 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 EN 60079-0 i IEC 60529. 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 przeciwybuchowej. 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 wykonanej z materiału niemetalowego. Węzeł musi również spełniać wymagania stawiane urządzeniom iskrobezpiecznym, podlega więc wytycznym norm PN-EN 60079-11: 2012 oraz PN-EN 60079-0:2013-03.

Norma PN-EN 60079-11: 2012 wyklucza pewne badania wymagane przez normę PN-EN 60079-0:2013-03. Zgodnie z zapisami normy PN-EN 60079-11: 2012, 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 elektroprzewodzącej 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 Rys. 93 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. 93. Widok obudów węzła typu NODE wykonanych różnymi technologiami, gdzie: PR1 - wydruk 3D z filamentu Zortrax ESD spełniającego wymogi rezystancji powierzchniowej [87], 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 [86].

Tab. 28. Wyniki pomiarów rezystancji powierzchniowej badanych próbek obudowy węzła typu NODE

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 [88]. 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. 94).



Rys. 94. 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.

Tab. 29. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie obudów węzłów sieci sensorycznej

Lp.	Badana próbka	Siła maksymalna [kN]	Odształcenie [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 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 przeciwybuchowej, 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 przeciwybuchowej, w przypadku której obwody elektryczne stanowiące tzw. obwody iskrobezpieczne muszą zostać powielone dwukrotnie. W przypadku uszkodzenia elementu zabezpieczającego pozostaje jeszcze jedno zabezpieczenie elektryczne.

Tab. 30. Zestawienie maksymalnych wartości parametrów wejściowych elementów projektowanej sieci sensorycznej

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

Materiały zastosowane w konstrukcji węzłów typu NODE oraz SINK powinny być ściśle określone przez wartości parametrów. Każde następane 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 tablicach 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 wężła NODE oraz SINK.

W tablicach 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 wężła typu NODE z wymaganiami pkt. 7.1, 7.5.2 oraz 8.4 normy PN-EN 60079-11: 2012. Schemat elektryczny wężła typu NODE przedstawiono w dodatku A (Rys. A.1).

Tab. 31. Obliczenia wielkości charakterystycznych obwodu elektrycznego wężła 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,  $I_{max}$  – obliczony maksymalny prąd płynący przez element,  $P_{max}$  – obliczona maksymalna moc rozpraszana na elemencie

Element	Parametry znamionowe oraz derating	Obliczenia / Uwagi	Spełnienie warunków
D1, D2, D6 PMEG1030	Dioda Schottky'ego $U_{max} = \frac{2}{3} * 40 = 26$ [V] $I_{max} = \frac{2}{3} * 2,1 = 1,4$ [A]	$I = 1,7 * (I_{F1}) = 1,7 * (0,125) = 0,213$ A	$P_{max} > P$
F1 0154.125DR	Bezpiecznik 125mA/125V $I_{max} = 0,125 * 1,7 = 0,213$ A $U_{max} = 125$ V $R_{min(-20^{\circ}C)} = 3,78 \Omega$	Zahermetyzowany, grubość zalewy > 1mm, $R_{min}$ z pomiarów 10 sztuk w temperaturze -20°C	$U_{max} > U_i$ (4V)
D17, D21, D22 MBR0530T1G	Dioda Schottky'ego $U_{max} = \frac{2}{3} * 30 = 20$ [V] $I_{max} = \frac{2}{3} * 0,5 = 0,33$ [A]	Zabezpieczone bezpiecznikiem F1, $I_{maxF1} = 1,7 * I_{F1} = 1,7 * 0,125 = 0,213$ A	$U_{max} > U_i$ (4V) $I_{max} > I_{maxF1}$
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]	$P = ((1,7 * I_{F1})^2 * R_{2min} / 2) * 1,5 = 0,31$ 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 $P_{\max} = \frac{2}{3} * 0,25 = 0,166 [W]$ $U_{\max} = \frac{2}{3} * 150 = 100 [V]$	$P = ((1,7 * I_{F1})^2 * R_{8_{\min}}) * 1,5$ =0,165W	$P_{\max} > P$ $U_{\max} > U_i$
R10 SMD1206- 2R2-1%	Rezystor SMD1206 R=2R2 - 1%= 2R $P_{\max} = \frac{2}{3} * 0,25 = 0,166 [W]$ $U_{\max} = \frac{2}{3} * 150 = 100 [V]$	$P = (1,7 * I_{F1})^2 * R_{10_{\min}} * 1,5$ =0,15W	$P_{\max} > P$ $U_{\max} > U_i$
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 60079-11: 2012 wartości pojemności w przypadku stosowanych napięć pracy nie spowodują zapalenia mieszanki wybuchowej.

Tożsamą procedurę zastosowano w przypadku obwodów elektrycznych węzłów typu SINK (Tab. 32). Schemat elektryczny węzła typu SINK przedstawiono w dodatku B (Rys. B.1).



Tab. 32. 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,  $I_{F1}$  – obliczony maksymalny prąd lynący przez element,  $P_{F1}$  – obliczona maksymalna moc rozpraszana na elemencie

Element	Parametry znamionowe + derating (2/3 - jeśli ma zastosowanie)	Obliczenia / Uwagi	Spełnienie warunków
D1, D2 PMEG1030	Dioda Schottky $U_{\max} = \frac{2}{3} * 40 = 26 [V]$ $I_{\max} = \frac{2}{3} * 2,1 = 1,4 [A]$	$I = 1,7 * (I_{F1}) = 1,7 * (0,125) = 0,213 [A]$	$P_{\max} > P$
F1 0154.125DR	Bezpiecznik 125mA/125 [V] $I_{\max} = 0,125 * 1,7 = 0,213 [A]$ $U_{\max} = 125 [V]$ $R_{\min(-20^{\circ}C)} = 3,78 [\Omega]$	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 $U_{\max} = \frac{2}{3} * 30 = 20 [V]$ $I_{\max} = \frac{2}{3} * 0,5 = 0,33 [A]$	Zabezpieczone bezpiecznikiem F1 $I_{\max F1} = 1,7 * I_{F1} = 1,7 * 0,125 = 0,213 [A]$	$U_{\max} > U_i (6 [V])$ $I_{\max} > I_{\max F1}$
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 wężła typu SINK również nie stwierdzono przekroczenia wartości maksymalnych.

Zgodnie z wymaganiami punktu 6.6.1 normy PN-EN 60079-11: 2012 maksymalna wartość mocy progowej źródła sygnałów radiowych w przypadku urządzeń grup I nie powinna przekraczać 6W (przy czasie indukcji zapłonu 200µs). Moc dostarczana do zasilania anteny układu radiowego  $P_{\text{radio}}$  wyniesie więc:

$$P_{\text{radio}} = \frac{(U_{VDD\_RADIO})^2}{Z_{f\_antena} = 50} = 0,72 [W] \quad (14)$$

gdzie:

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

$Z_{f\_antena}$  - impedancją falową anteny [ $\Omega$ ].

Moc zasilania obwodu radia wynosi  $P_{VDD\_RADIO}=1,278W$ , 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 60079-11: 2012.

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 60079-0:2013-03 i PN-EN 60079-11: 2012).

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

## 8. Podsumowanie i dalsze kierunki badań

W ramach realizacji pracy doktorskiej opracowany został algorytm trasowania sieci sensorycznych, który może być stosowany do zarządzania pracą sieci sensorycznych zastosowanych w strefach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego.

Przeprowadzona analiza literaturowa pozwoliła na wyspecyfikowanie warunków eksploatacyjnych pracy sieci sensorycznej (rozdział 2), kolejno opisano elementy kompleksu ścianowego jakie poddane są najczęściej monitoringowi realizowanemu przez sieci sensorów (rozdział 2.1). Uzasadniono potrzebę monitoringu sekcji obudowy zmechanizowanej oraz przykładowy sposób wykorzystania w prawidłowym prowadzeniu ściany wydobywczej i predykcji zagrożeń jak tąpnięcia, obwały i zwały skał. Opisano również problemy związane z monitoringiem parametrów sekcji obudowy zmechanizowanej oraz konieczność uzyskania wysokiej niezawodności pracy sieci w tych obszarach (rozdział 2.2).

W rozprawie scharakteryzowano również warunki pracy towarzyszące procesowi urabiania oraz opisano wymagania stawiane urządzeniom pracującym w monitoringu kompleksu ścianowego, które określają normy zharmonizowane z dyrektywą ATEX (rozdział 2.3).

Przeprowadzona została analiza algorytmów trasowania sieci sensorycznych pracujących obecnie w zarządzaniu transmisją danych w tych sieciach (rozdział 3.1). Kolejno wykonano przegląd i analizę testów symulacyjnych wybranych algorytmów trasowania.

Wynikiem analizy było wskazanie algorytmów pracujących w oparciu o inteligencję roju jako rozwiązań charakteryzujących się najlepszymi parametrami w porównaniu ze stosowanymi algorytmami reaktywnymi oraz proaktywnymi. Stwierdzono jednak, że wyniki symulacji muszą zostać potwierdzone poprzez walidację algorytmów bazujących na inteligencji roju w rzeczywistych układach elektronicznych sieci sensorycznej (rozdziały 3.2 oraz 3.3).

W pracy zawarto również opis sposobu implementacji wybranych algorytmów bazowych w modelu sieci sensorycznej (rozdział 4.1) oraz szczegółowo opisano niezbędne modyfikacje wprowadzone w celu implementacji algorytmu bazowego do prototypu sieci sensorycznej składającej się maksymalnie z 30 węzłów (rozdział 4.2).

Przeprowadzono prototypowanie oraz uruchomienie środowiska walidacji, które pozwoliło na weryfikację działania algorytmów w warunkach rzeczywistych (rozdział 5) oraz walidację zdefiniowanych kryteriów poprawności działania. Przeprowadzono wybór modułu sprzętowego stanowiącego rdzeń pojedynczego węzła sieci sensorycznej (moduł radiowy nRF52 firmy National Semiconductor; rozdział 5.1). Dobrano, zestawiono i skonfigurowano elementy sprzętowe oraz programowe pozwalające na diagnostykę określonych kryteriów pracy algorytmów trasowania (rozdziały 5.2, 5.3 oraz 5.4).

Kolejno zbudowano model sieci sensorycznej składającej się z trzech węzłów na którym przeprowadzono wstępną walidację algorytmów wybranych podczas procesu analizy testów symulacyjnych. W ramach badań sprawdzono i oceniono działanie protokołów bazujących na algorytmie mrówkowym (ACO), algorytmie optymalizacji rojem cząstek (PSO) oraz algorytmie pszczelim (BEE). Opisano i wskazano proces implementacji poszczególnych algorytmów oraz czynniki wymagane przy rozbudowie liczby węzłów sieci. Przeprowadzone badania pozwoliły na wybór algorytmu optymalizacji rojem cząstek bazującego na elementach algorytmu mrówkowego do dalszych badań (rozdział 6.1).

Opisano proces walidacji opracowanego algorytmu do prototypu sieci składającej się z 30 węzłów. Przeprowadzono walidację algorytmu sieci składającej się z 30 węzłów oraz opisano proces jego modyfikacji (rozdział 6.2). Kolejno przeprowadzono analizę statystyczną (z zastosowaniem programu PQSTAT) zebranych danych metodą ANOVA Kruskala-Wallisa. W celu porównania opracowanego algorytmu SI z algorytmem bez implementacji SI zastosowano metodę U Manna-Whitneya (rozdział 6.3).

Z przeprowadzonych analiz wynika, że sieć pracująca w oparciu o zaimplementowany przez Autora pracy algorytm pozwala na obniżenie czasu dotarcia pakietu do miejsca docelowego pomimo wzrostu liczby węzłów w sieci sensorycznej, stabilizuje współczynnik pewności dostarczenia danych do miejsca docelowego, a także umożliwia transmisję danych z wyższą przepustowością w porównaniu ze standardowymi algorytmami stosowanymi w sieci. Sieć sensoryczna pracująca w oparciu o opracowany algorytm adaptuje się do zmian struktury wynikających z uszkodzenia, przemieszczenia lub dodania nowego węzła sieci. Opracowane rozwiązanie pozwala na kompensację ograniczeń funkcjonalnych sieci sensorycznej koniecznych do wprowadzenia w budowie pojedynczego węzła sieci z powodu konieczności spełniania wymagań dyrektywy ATEX w przypadku urządzeń pracujących w strefach zagrożonych wybuchem. Takie podejście pozwala na zachowanie stabilnych parametrów pracy mimo wprowadzenia ograniczeń konstrukcyjnych zapewniających bezpieczeństwo eksploatacyjne. Pozwala to stwierdzić, że teza pracy została spełniona.

Opracowane rozwiązanie algorytmu trasowania pozwala zwiększyć niezawodność działania sieci sensorycznej pracującej w monitoringu sekcji obudowy zmechanizowanej. Umożliwia dostosowanie parametrów pracy sieci sensorycznej pracującej w predykcji takich zagrożeń jak tąpnięcia i obwały skał. Pozwala również na zwiększenie częstotliwości odczytu danych przy zachowaniu parametrów pracy sieci, mimo zmian wprowadzonych w budowie węzłów sieci w celu spełnienia wymagań bezpieczeństwa eksploatacyjnego.

W ramach realizacji pracy przeprowadzono również prace projektowe polegające na opracowaniu dokumentacji elektrycznej i konstrukcyjnej pojedynczego węzła sieci (dodatek A

oraz B). Opracowane rozwiązania poddano analizie spełnienia przez nie wymagań norm zharmonizowanych z dyrektywą ATEX. Zaproponowano i przeanalizowano możliwość wykonania obudowy pojedynczego węzła sieci w technologii druku 3D lub odlewu z formy silikonowej (rozdziały 7.1 oraz 7.2).

Konieczne jest jednak prowadzenie dalszych prac w celu rozwoju algorytmu trasowania i weryfikacji jego działania w warunkach in-situ. W związku rozwojem Przemysłu 5.0, a także idei IIoT w przemyśle wydobywczym wzrasta liczba elementów diagnostycznych pracujących w sieciach sensorycznych. Przeprowadzone badania wskazały możliwość zastosowania algorytmów pracujących w oparciu o inteligencję roju do zarządzania transmisją w omawianych typach sieci. Konieczne jest jednak prowadzenie dalszych badań nad rozbudową algorytmu do celów dostosowania działania w sieciach składających się z tysięcy węzłów.

## Literatura

1. Al-Karaki, J. N., Kamal, A. E.: Routing techniques in wireless sensor network: A survey. *IEEE Wireless Communication*, 2004,11(6), 6-28.
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, 14(24), 8541.
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.
4. Biliński A., Kostyk T., Prusek S.: Zasady doboru obudowy zmechanizowanej dla wyrobisk ścianowych, *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie* 1997, 3: 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, 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, p. 22-31.
7. Brodny, J., Tutak, M.: Symulacja numeryczna jako narzędzie wspomagające ocenę zagrożenia metanowego w kopalni węgla kamiennego. *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie/Politechnika Śląska*, 2017, 100, 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, 57.
9. Chan, F.T.S, Tiwari, M. K.: *Swarm Intelligence: Focus on Ant and Particle Swarm Optimization*, I-Tech Education and Publishing, 2007, 64.
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, 11, 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, 86.6: 569.
12. Dezfouli, B., Abu Bakar, K., Lee, M.: Multipath Routing in Wireless Sensor Networks: Survey and Research Challenges. *Sensors*, 2012, 12(1), 650-685.

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.
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.
15. Dyczko A.: Automatykacja 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, ISSN 2450-9442.
17. Gherbi, C., Aliouat, Z., Benmohammed, M.: A survey on clustering routing protocols in wireless sensor networks. *Sensor Review*, 2017,37.1, 12-25.
18. Ghawy, 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, 1, 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, 12(17), 3628.
20. Honyasz 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. 2000.
22. Huang, G., Zhou, P., Zhang, L.: Wireless sensor network for HVAC applications: a review, Conference: 12th International Conference on Sustainable Energy technologies , 2013.
23. Jabbar, S.: Energy efficient strategy for throughput improvement in wireless sensor networks. *Sensors*, 2015, 15.2, 2473-2495.
24. Jagoda, J., Hetmańczyk, M., Stankiewicz, K.: Dispersed, self-organizing sensory networks supporting the technological. *Mining Machines*, 2021, 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, 76-185.



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, 13(9), 5396.
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, 14(11), 4393.
28. Jasiulek, D., Płonka, M., & Lubryka, J.: System monitorowania geometrii sekcji obudowy zmechanizowanej. *Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji*, 2019, 8.
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.
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, 16(23), 7710.
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, 4 (536), 55-64.
32. Jaszczuk M.: Systemy zintegrowanego sterowania układem technologicznym ściana wydobywcza – punkt załadowniczy. Seria: Innowacyjne techniki i technologie mechanizacyjne. Centrum Mechanizacji Górnictwa KOMAG, Gliwice 2008.
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, vol. 62, no. 4.
34. Jaszczuk, M., Pawlikowski, A.: Charakterystyki podpornościowe sekcji obudowy zmechanizowanej. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, 2006, z. 274.
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*, 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, 21(8), 10174-10182.
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, 59.

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, 2(99), 317-323.
41. Kozyra, J., Zieliński, K.: Urządzenia elektryczne stosowane w obiektach zagrożonych wybuchem. *TTS Technika Transportu Szynowego*, 2013, 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, 46, 367-380.
43. Krupanek, B., Bogacz, R.: Protokoły routingu dla systemów Internetu Rzeczy-badania symulacyjne wybranych protokołów. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2018, ISSN 0033-2097.
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*, 2007, pp. 1-5.
45. Lee, M.: Multipath routing in wireless sensor networks: Survey and research challenges. *Sensors*. 2012.
46. Lindsey, S., Raghavendra, C. S.: PEGASIS: Power efficient gathering in sensor information systems. *Proceedings of the IEEE. Aerospace conference*, 2002.
47. Manjeshwar, A., Dharma P. A.: TEEN: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks. , 2001, Vol. 1.
48. Manjeshwar, A., Dharma P. A.: APTEEN: A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks. *Parallel and distributed processing symposium, international. IEEE Computer Society*, 2002, Vol. 3.
49. Nguyen, M.T., Teague, K.A.: Compressive sensing based random walk routing in wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2017, 54, 99-110.
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.
53. Priyanka, S., Tanmay, K.: A review on specification evaluation of broadcasting routing protocols in VANET, *Computer Science Review*, 2021, Volume 41, 100418, ISSN 1574-0137.

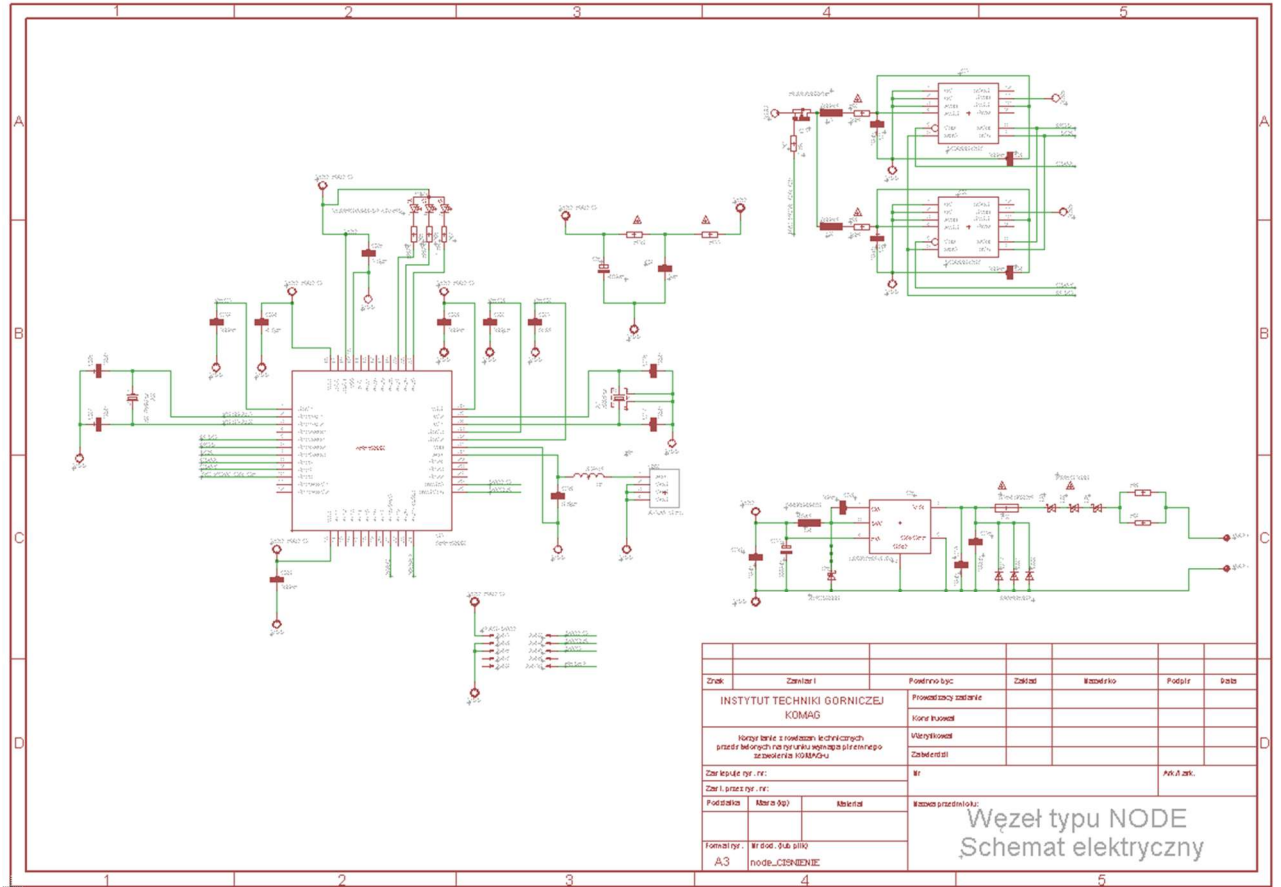
54. Prusek, S., Rajwa, S., Wrana, A., Krzemień, A.: Assessment of roof fall risk in longwall coal mines. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2016.
55. Prusek, S., Płonka, M., Walentek, A.: Applying the ground reaction curve concept to the assessment of shield support performance in longwall faces. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9 (167).
56. Pytlik, A., Paczeński, K., Kot, D., Krodkiwski, J.: System pomiarowy do badania statycznego i dynamicznego ciśnienia w stojakach hydraulicznych sekcji obudowy zmechanizowanej. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 2009, 47(4), 48-59.
57. Rajwa, S., Prusek, S., Szuścik, J., Gąska, R.: Prowadzenie ściany pod gruzowiskiem zawałowym w warunkach zmiennej grubości pozostawionej warstwy przyspągowej. *Przegląd Górniczy*, 2017, 6, s. 33-37.
58. Smolarek, A., Malinowski, T.: Protokoły trasowania w sieciach ad hoc. *Zeszyty Naukowe Warszawskiej Wyższej Szkoły Informatyki*, 2012.
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, 3, 145-154.
61. Stankiewicz, K., Jagoda, J., Tonkins, M.: Intelligent algorithms for routing sensory networks operating in explosion hazard zones. *Mining Science*, 2021, 28.
62. Stoiński, K., Kostyk, T.: Sposób określania upodatkienia sekcji zmechanizowanej obudowy ścianowej-metodą analityczną. *Maszyny Górnicze*, 2005, 23(3), 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, 14(13), 3774.
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, 58(2), 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. *Czasopismo Nowoczesnego Górnictwa*, 2020, nr 2, 542.

68. Turek, M.: Eksploatacja podziemna pokładów węgla kamiennego - współczesne wyzwania. Cz. 9, System ścianowy podłużny z zawałem stropu w pokładach o małym nachyleniu. *Wiadomości Górnicze*, 2009, Tom 60, nr 12, 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.
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.: BeeAdHoc: An Energy Efficient Routing Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks Inspired by Bee Behavior. *Conference: Genetic and Evolutionary Computation Conference. Proceedings*, 2005.
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, 28(1).
73. Voigt, T., Ritter, H., & Schiller, J.: Solar-aware routing in wireless sensor networks. *Proceedings of personal wireless communication*, 2023.
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](http://www.czek.eu) (dostęp: 15.02.2024)
77. 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.
78. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych. (Dz.U.02.139.1169).
79. Dyrektywa 94/9/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 marca 1994. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/ALL/?uri=CELEX%3A31994L0009> (dostęp: 05.11.2023)
80. Strona internetowa firmy Famur: <https://famur.com/urządzenia-dla-gornictwa-podziemnego/obudowy-zmechanizowane/> (dostęp: 28.08.2023)

81. Strona internetowa <https://pl.all.biz/przenosnik-zgrzeblowy-scianowy-g89921> (dostęp: 28.08.2023)
82. Strona internetowa <https://www.directindustry.com/prod/famur/product-58723-2031381.html> (dostęp: 11.09.2023)
83. Strona internetowa <https://www.slideserve.com/elia/grupa-famur-nowe-kierunki-modernizacji-podziemnej-eksploatacji-węgl> (dostęp: 11.09.2023)
84. Strona internetowa <https://apautomatyka.pl/klasyfikacja-strefy-ex/> (dostęp: 11.09.2023)
85. Strona internetowa <https://www.bluerange.io/docs/fruitymesh/index.html> (dostęp: 15.02.2024)
86. Strona internetowa <https://wzorcowaniemiernikow.pl/k/bm878-multimetr-rezystancja-izolacji/> (dostęp: 15.02.2024)
87. Strona internetowa <https://zortrax.com/pl/filaments/z-esd/> (dostęp: 05.02.2024)
88. Strona internetowa <https://www.hempel.com/pl-pl/produkty/hempaprime-multi-500-atex-45951> (dostęp: 05.02.2023)

# DODATKI

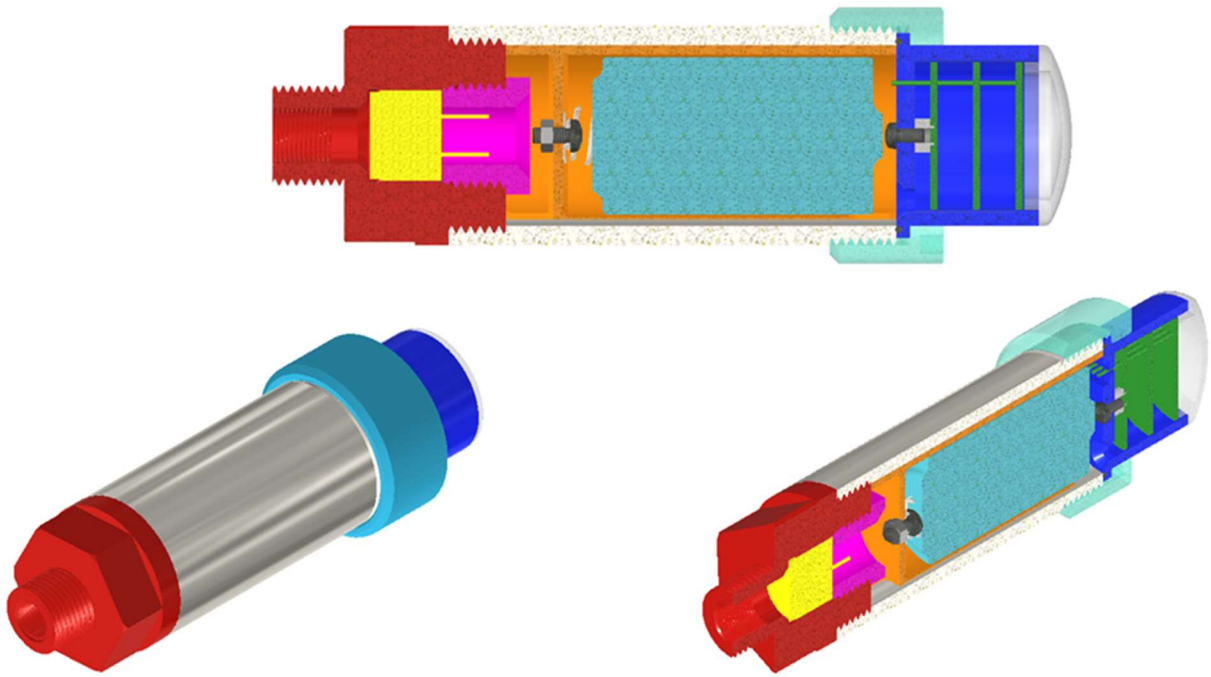
**Dodatek A** - Schematy elektryczne oraz modele 3D pojedynczych węzłów sieci typu NODE (pracujących w charakterze inklinometrów oraz czujników ciśnienia).



Rys. A1. Schemat węzła typu NODE - dokumentacja elektryczna



Rys. A2. Widok modelu 3D węzła typu NODE (inklinometr)



Rys. A3. Widok przekroju modelu 3D węzła typu NODE (czujnik ciśnienia)

