



POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ
ZAKŁAD PROJEKTOWANIA TECHNOLOGII

Prof. dr hab. inż. Stanisław LEGUTKO
 dr h.c., prof. h. c.

ul. Piotrowo 3 60-965 Poznań
 tel. (0-61) 665-25-77, fax
 (061) 665-22-00
 e-mail: stanislaw.legutko@put.poznan.pl

Poznań, 14.12.2024r.

Recenzja nr 65/dr/SL
rozprawy doktorskiej mgr inż. Jerzego Jagody pt.
Opracowanie oraz walidacja algorytmu trasowania sieci sensorycznych z zastosowaniem
inteligencji roju

Podstawa opracowania recenzji: pismo Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna z Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej dr hab. inż. Alicji Piaseckiej-Belkhat prof. PŚ nr RDIMe.512.11.2024 z dnia 23.10.2024 roku oraz stosowna umowa o dzieło.

Wymienione dokumenty odebrałem 4.11.2024 r.

1. Podstawowe dane dotyczące Kandydata

Mgr inż. Jerzy Jagoda w latach 2002–2007 studiował na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej, na kierunku Elektronika i Telekomunikacja, uzyskując tytuł magistra inżyniera w specjalności Telekomunikacja. W latach 2017–2018 był uczestnikiem studiów podyplomowych z zakresu przygotowania pedagogicznego. W 2020 roku rozpoczął studia doktoranckie na Politechnice Śląskiej, na Wydziale Mechanicznym Technologicznym, w Katedrze Automatyzacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania, w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Doświadczenie zawodowe zdobywał w latach 2006–2024, zaczynając swoją pracę zawodową na stanowisku projektant-programista w firmie Digital Core Design sp. z o.o. (2006–2008), następnie został zatrudniony w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG, początkowo na stanowisku młodszy konstruktor (2009–2011), następnie konstruktor (2011–2014), specjalista ds. projektowo-badawczych (2014–2019), starszy specjalista ds. projektowo-badawczych (2019–2024). Od 2024 roku pełni funkcję kierownika grupy tematycznej ds. Systemów Mechatronicznych w Zakładzie Systemów Mechatronicznych.

Kandydat jest współautorem 31. publikacji oraz trzech zgłoszeń patentowych. Cztery artykuły są rozpowszechnieniem wyników badań wykonanych w ramach rozprawy doktorskiej.

Zgodnie z oświadczeniem mgr inż. Jerzy Jagoda nie ubiegał się wcześniej o nadanie stopnia naukowego doktora.

2. Analiza rozprawy

2.1. Tytuł rozprawy i ocena aktualności podjętego problemu naukowego

Tytuł rozprawy doktorskiej przedstawionej do recenzji jest następujący: *Opracowanie oraz walidacja algorytmu trasowania sieci sensorycznych z zastosowaniem inteligencji roju*. Na wstępie

analizy rozprawy chciałbym przedstawić ocenę aktualności podjętego zagadnienia naukowego. Poza tym identyfikacja usytuowania niniejszej pracy na tym tle oraz zarysowanie głównych dróg rozwoju tego obszaru, w którym ona się mieści, pozwoli na osądzenie, czy Autor trafnie wybrał tematykę badawczą.

Recenzowaną rozprawę doktorską, z naukowca punktu widzenia, można ulokować przede wszystkim w sferze nowoczesnych badań nad optymalizacją i zarządzaniem danymi w sieciach sensorów, szczególnie z perspektywy automatyzacji oraz poprawy bezpieczeństwa eksploatacji urządzeń i systemów górniczych. Praca mgr. inż. Jerzego Jagody jest osadzona w warstwie metodycznej współczesnej inżynierii mechanicznej, ze szczególnym uwzględnieniem wdrażania zaawansowanych algorytmów inteligencji roju do zarządzania i trasowania w sieciach czujników w środowisku przemysłowym. Badania Autora skierowane są ku integracji sieci sensorycznych w sposób pozwalający na efektywne przetwarzanie oraz przekazywanie danych w czasie rzeczywistym, co jest kluczowe w warunkach wysokiego ryzyka eksploatacyjnego towarzyszącego pracom podziemnym, szczególnie w górnictwie.

W kontekście czwartej rewolucji przemysłowej, znanej szerzej jako Przemysł 4.0, podejmowane badania nad implementacją rozwiązań automatyzacji w górnictwie odgrywają fundamentalną rolę, biorąc pod uwagę specyficzne zagrożenia i wymagania tego sektora. Idea Przemysłu 4.0, która od już niemal kilkunastu lat rozwija się dynamicznie, jest w istocie złożonym podejściem opartym na połączeniu inteligentnych maszyn i zaawansowanych systemów cyfrowych w celu uzyskania większej efektywności, elastyczności oraz precyzji operacyjnej. Integracja maszyn, systemów komputerowych oraz technologii Internetu Rzeczy (IoT) przynosi szczególne korzyści w sferach wymagających szczególnej uwagi ze względu na bezpieczeństwo oraz niezawodność, jak właśnie sektor górniczy. Założeniem koncepcji Przemysłu 4.0 jest nie tylko zwiększenie wydajności, ale także znaczne podniesienie poziomu bezpieczeństwa przez możliwość predykcji zagrożeń, monitorowania oraz inteligentnej reakcji na zmiany zachodzące w systemie.

IoT, czyli Internet Rzeczy, staje się filarem tej rewolucji, umożliwiając kreowanie coraz bardziej rozbudowanych i złożonych systemów monitoringu oraz kontroli eksploatacyjnej. Przekształcenie maszyn i urządzeń górniczych w inteligentne jednostki monitorowane w czasie rzeczywistym pozwala nie tylko na zbieranie i analizowanie danych, lecz także na szybsze podejmowanie decyzji na podstawie dynamicznie zmieniających się parametrów, takich jak temperatura, ciśnienie czy stężenie gazów. Dzięki systemom IoT możliwe jest zdalne diagnozowanie i predykcja awarii, co pozwala na wcześniejsze wdrażanie procedur zapobiegawczych, a tym samym na zmniejszenie ryzyka potencjalnych wypadków. Rozprawa mgra inż. Jerzego Jagody, w której Autor koncentruje się na opracowaniu algorytmu trasowania w sieciach sensorycznych opartego na inteligencji roju, odpowiada na te potrzeby, wprowadzając nowatorskie rozwiązania, które mogą wpłynąć na zwiększenie niezawodności oraz funkcjonalności tych sieci.

Specyfika środowiska górniczego, w którym funkcjonują omawiane sieci czujników, wiąże się z wyjątkowymi wyzwaniami technicznymi. Eksploatacja złóż podziemnych niesie za sobą liczne zagrożenia, w tym możliwość wybuchu metanu, czy pyłu węglowego. Wymaga to wysokiego poziomu zabezpieczeń i precyzyjnego monitorowania parametrów w środowisku pracy. W takich warunkach zastosowanie zintegrowanych systemów IoT może prowadzić do skuteczniejszego wykrywania zagrożeń na podstawie bieżących analiz danych. Tym samym, IoT w górnictwie umożliwia automatyzację wielu procesów monitorowania, eliminując konieczność obecności człowieka w najniebezpieczniejszych strefach. Dzięki automatyzacji można osiągnąć pełną autonomię procesów wydobywczych, co jest szczególnie istotne w kontekście drążenia nowych wyrobisk na dużych głębokościach, gdzie ryzyko awarii sprzętu lub nagłych zagrożeń naturalnych jest bardzo wysokie. Pełna automatyzacja procesu drążenia, możliwa dzięki integracji IoT i innych

elementów Przemysłu 4.0, stanowi przełomowy krok w kierunku poprawy bezpieczeństwa pracy w górnictwie. Eliminacja obecności człowieka w strefach z największym ryzykiem, takich jak przodki drążonych chodników, czy wyrobiska ścianowe, jest uznawana za jedno z najważniejszych osiągnięć współczesnej inżynierii. Wyeliminowanie człowieka z takich obszarów, przez zastosowanie autonomicznych maszyn, jest ogromnym postępem z punktu widzenia ochrony życia i zdrowia pracowników. Systemy autonomiczne, które dzięki rozwojowi IoT i technologii sztucznej inteligencji mogą działać samodzielnie w trudnych warunkach, są pożądanym rozwiązaniem zmierzającym do zapewnienia ciągłości pracy w kopalniach, szczególnie tam, gdzie człowiek jest narażony na ekstremalne warunki lub szybkie zmiany środowiska pracy.

Rozprawa mgra inż. J. Jagody wpisuje się w ten kontekst nowoczesnych rozwiązań technologicznych, albowiem Autor dąży do opracowania i walidacji algorytmu trasowania, za pomocą którego można optymalizować przepływ danych w sieci czujników monitorujących stan obudowy zmechanizowanej. Dzięki zastosowaniu inteligencji roju, algorytmy te naśladują naturalne mechanizmy obserwowane w przyrodzie, co pozwala na skuteczną adaptację w rozbudowanych, dynamicznych sieciach sensorycznych. Mechanizmy oparte na interakcjach między cząstkami lub osobnikami mogące wspólnie tworzyć złożone struktury lub rozwiązywać skomplikowane problemy, są szczególnie przydatne w aplikacjach takich, jak sieci sensoryczne w górnictwie, gdzie niezawodność oraz elastyczność działania stanowią fundament sukcesu operacyjnego.

Autor pracy proponuje rozwiązania, które mają na celu zoptymalizowanie trasowania danych między poszczególnymi węzłami sieci czujników, co pozwala na szybsze przesyłanie kluczowych informacji do centrów dyspozytorskich i analitycznych. Dzięki temu możliwe jest monitorowanie parametrów eksploatacyjnych i podejmowanie decyzji w sposób dynamiczny, co jest kluczowe dla stabilności procesów oraz predykcji zagrożeń. Podejście oparte na inteligencji roju w kontekście sieci sensorycznych w górnictwie to innowacja, która otwiera nowe możliwości w zakresie organizacji trasowania danych, optymalizacji zużycia energii oraz adaptacji do zmiennych warunków środowiskowych, charakterystycznych dla przestrzeni górniczych.

Motywacją do podjęcia problematyki rozważanej w niniejszej dysertacji były zarówno wyzwania i potrzeby płynące z rzeczywistych warunków eksploatacji górniczej, jak i wyniki wcześniejszych badań prowadzonych przez projektantów i badaczy z dziedziny automatyzacji i monitoringu w przemyśle wydobywczym. Co istotne, Autor pracy zdobył bogate doświadczenie związane z projektowaniem, wdrażaniem oraz serwisowaniem urządzeń sensorycznych w środowisku górniczym, pracując nad realizacją projektów krajowych i międzynarodowych. Dzięki specyfice swojej pracy miał możliwość projektowania oraz wdrażania rozwiązań dostosowanych do stref zagrożonych wybuchem, co pozwoliło mu lepiej rozumieć specyfikę problemów związanych z eksploatacją w takich warunkach. Tematyka niniejszej pracy jest aktualna i ma wymiar praktyczny, gdyż proponowane rozwiązania w zakresie efektywnego trasowania danych i niezawodności sieci sensorowych mogą znaleźć bezpośrednie zastosowanie w procesach górniczych.

Recenzowana dysertacja, w której Autor podejmuje się opracowania i walidacji algorytmu trasowania sieci sensorycznych z zastosowaniem inteligencji roju, wpisuje się w zasadniczy nurt współczesnych badań w dziedzinie inżynierii mechanicznej, zwłaszcza w kontekście zastosowań w trudnych warunkach górniczych. Wymienioną okoliczność poczytuję przeto za potwierdzenie **trafności i sensowności wyboru tematyki badawczej**. Uzasadnieniem tej opinii jest nie tylko sam fakt usytuowania pracy na szerszym tle formułowanych obecnie wyzwań i wykonywanych badań, ale i to, że podejmowana w rozprawie doktorskiej tematyka szczegółowa rokuje nadzieje epistemologiczne, a także, co też ma szczególne znaczenie w kontekście rozpatrywanej tematyki, nadzieję na uzyskanie walorów użytkowych.

Liczący się w polskiej akademickiej społeczności technicznej ośrodek naukowy, jakim jest Politechnika Śląska wnosi twórczy wkład, m. in. w rozwój tych warstw inżynierii mechanicznej, które określam, jako metodyczną i merytoryczną. Inicjatywy wielu znakomitych profesorów, twórców szkół naukowych, między innymi: Eugeniusza Świtońskiego i Jerzego Świdra, są z powodzeniem rozwijane przez ich uczniów oraz uczniów ich uczniów i są doskonale znane w środowisku zainteresowanych specjalistów. Recenzowana rozprawa doktorska mgra inż. Jerzego Jagody, napisana pod kierunkiem dra hab. inż. Mariusza Hetmańczyka, prof. PŚI, powstała na fundamencie wielu wcześniejszych badań oraz prac obejmujących monitorowanie i automatyzację w górnictwie i stanowi kolejne ogniwo, które jest logicznie usytuowane w całym ciągu badań naukowych, prowadzonych także w ośrodku zatrudniającym Doktoranta. Dysertacja powstała więc na starannie przygotowanym i w wysokiej kulturze utrzymywanym gruncie wcześniejszego rozpoznania merytorycznego i metodycznego scharakteryzowanego powyżej obszaru inżynierii mechanicznej.

2.2. Analiza struktury rozprawy doktorskiej, przytoczonego piśmiennictwa, celów pracy, zastosowanych metod badawczych, przedstawionych wyników badań i potencjału ich zastosowania oraz osiągnięcia naukowego

Strukturę rozprawy stanowi osiem rozdziałów, wykaz ważniejszych oznaczeń, spis literatury i dodatki w postaci schematów elektrycznych i modeli 3D opracowanych węzłów sieci. Brak streszczenia w języku polskim i angielskim. Przedstawiona rozprawa jest spójna tematycznie. **Układ pracy** jest prawidłowy - typowy dla prac analityczno-eksperymentalnych. **Tytuł dysertacji** jest zgodny z jej treścią.

W rozdziale pierwszym zatytułowanym **Wprowadzenie** Autor syntetycznie przedstawia współczesne wymagania dotyczące zarządzania procesami produkcyjnymi i monitoringiem w kontekście górnictwa węgla kamiennego. Doktorant podkreśla rolę, jaką pełnią systemy przekazywania informacji w czasie rzeczywistym, stanowiące podstawę zarządzania efektywnością i bezpieczeństwem eksploatacji złóż. Szczególne znaczenie mają przepisy prawa geologicznego i górniczego, które nakładają na przedsiębiorstwa szereg obowiązków w zakresie bezpieczeństwa pracowników, nadzoru nad procesami technologicznymi oraz monitorowania zagrożeń środowiskowych. W dalszej części rozdziału mgr inż. J. Jagoda omawia kluczowe znaczenie monitoringu i diagnostyki maszyn górniczych, co stanowi fundament bezpiecznego i wydajnego prowadzenia prac wydobywczych. Monitoring obejmujący wszystkie etapy procesu wydobycia realizowany jest za pomocą systemów nadzoru central dyspozytorskich, a dane pozyskiwane ze specjalnych urządzeń i czujników służą do diagnozowania stanu technicznego maszyn, wykrywania stanów awaryjnych i automatyzacji procesu urabiania. Autor podkreśla, że przesyłanie informacji do central dyspozytorskich za pomocą wewnętrznej sieci komunikacyjnej przyspiesza działania serwisowe i zapewnia utrzymanie prawidłowego stanu eksploatacyjnego urządzeń. Jednocześnie Autor wskazuje, że rozwój takich sieci diagnostyczno-sterujących zmierza ku autonomizacji procesu urabiania, co nie tylko zwiększa efektywność, lecz także znacząco poprawia bezpieczeństwo w kontekście nowych złóż znajdujących się na znacznych głębokościach, gdzie maszyny są narażone na ekstremalne warunki geologiczne i górnicze. W podrozdziale dotyczącym genezy problemu Doktorant zwraca uwagę na konieczność efektywnej organizacji transmisji danych w rozbudowanych sieciach sensorycznych, działających w wyrobiskach górniczych. Autor opisuje kluczowe aspekty, takie jak niezawodność działania, elastyczność konfiguracji oraz bezpieczeństwo eksploatacyjne, które muszą być zapewnione w sieciach czujników, aby były one skuteczne w zastosowaniach przemysłowych. Podkreśla, że niezawodność działania polega na zapewnieniu ciągłego dostarczania danych do punktów dyspozytorskich, co wymaga zmniejszenia awaryjności

oraz szybkiej identyfikacji i wymiany uszkodzonych czujników. Elastyczna konfiguracja sieci jest równie istotna, aby ułatwić serwisowanie, implementację oraz dostosowanie struktury sieci do zmieniających się potrzeb i warunków eksploatacyjnych. Wskazuje ponadto, że większość nowoczesnych sieci czujników, które są montowane w urządzeniach i maszynach górniczych, posiada bezprzewodowe interfejsy transmisji danych oraz spełnia wymagania europejskiej dyrektywy ATEX, dotyczącej bezpieczeństwa urządzeń w strefach zagrożonych wybuchem. Niemniej jednak spełnienie tych wymagań wiąże się często z większym zużyciem energii, co z kolei skraca żywotność baterii. Autor zwraca również uwagę na zastosowanie inteligentnych algorytmów trasowania oraz zaawansowanych algorytmów transmisji danych w sieciach czujników, co umożliwi efektywne zarządzanie przepływem danych w rozległej infrastrukturze.

Jako punkt wyjścia do podjęcia merytorycznych działań własnych, w dalszej części tego rozdziału, Autor sformułował **tezę pracy**, będącą fundamentem Jego badań, 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”. Treść tak sformułowanej tezy jest wyrazem nadziei Doktoranta, że algorytmy trasowania oparte na inteligencji roju, zastosowane w specyficznych warunkach środowiska kopalnianego, będą w stanie sprostać wymaganiom stawianym współczesnym systemom monitoringu i automatyzacji procesów wydobywczych. Pojawiają się jednakże pytania: jak zmierzyć „odpowiednią organizację przesyłu informacji”, jak ocenić zwiększenie „wymaganej niezawodności działania, elastyczności konfiguracji i poziomu bezpieczeństwa eksploatacyjnego”? W rozdziale tym Autor zidentyfikował także niszę badawczą i zdefiniował **cele naukowe pracy**, które dotyczą:

- wyboru algorytmu bazowego – w ramach tego celu należy wykonać analizę istniejących algorytmów trasowania, spośród których należy wyłonić najlepsze rozwiązania, jako podstawę do opracowania algorytmu autorskiego, uwzględniając specyficzne potrzeby i zagrożenia występujące w środowisku kopalnianym;
- opracowania środowiska walidacji - środowisko to obejmuje szereg elementów, takich jak weryfikacja rozwiązań sprzętowych, definicja bazowych węzłów sieci sensorycznej, opracowanie aplikacji nadzorującej pracę czujników, a także dobór środowiska programistycznego umożliwiającego testowanie funkcjonalności w realistycznych warunkach symulacyjnych;
- przeprowadzenia procesu walidacji algorytmu trasowania – co obejmuje iteracyjną implementację algorytmu w sieci sensorycznej oraz badanie wpływu algorytmu na kluczowe parametry sieci, takie jak przepustowość, automatyczna konfiguracja oraz czas przesyłu danych - co z kolei pozwala na optymalizację oraz wprowadzanie niezbędnych poprawek;
- analizy zastosowanych rozwiązań sprzętowych – należy szczegółowo przeanalizować zgodność sprzętowych rozwiązań poszczególnych węzłów sieci pod kątem wymogów dyrektywy ATEX, która reguluje kwestie bezpieczeństwa urządzeń pracujących w strefach zagrożonych wybuchem.

Przedstawione cele naukowe rozprawy można uznać za przemyślaną i klarowną charakterystykę zarówno zakresu, jak i sposobu realizacji pracy badawczej. Cele wynikają z pogłębionej analizy dotychczasowego stanu wiedzy i konkretnych wymagań przemysłowych. **Celem użytecznym** badań jest automatyzacja procesu monitorowania i sterowania pracą ściany wydobywczej oraz opracowanie systemu predykcji zagrożeń, takich jak tąpnięcia i obwały skał. Algorytm opracowany przez Autora ma wspierać działanie sieci sensorycznych monitorujących pracę sekcji obudowy zmechanizowanej, umożliwiając pozyskiwanie niezbędnych danych do

autonomicznego sterowania procesem wydobywania, co jest kluczowe w kontekście poprawy bezpieczeństwa i efektywności pracy w kopalniach.

Szczegółowa i dogłębna analiza literatury dotyczącej technologii urabiania i monitorowania obudów zmechanizowanych została przedstawiona w drugim rozdziale pracy. Mgr inż. Jerzy Jagoda scharakteryzował i poddał krytycznej analizie najważniejsze technologie i rozwiązania stosowane we współczesnym górnictwie, ze szczególnym uwzględnieniem specyfiki polskiego przemysłu wydobywczego. Omówione zostały różnorodne systemy monitorowania i diagnostyki pracy obudowy zmechanizowanej, w tym systemy kontroli parametrów, takich jak podporność wstępna oraz wytrzymałość na dynamiczne obciążenia, co jest szczególnie istotne w kontekście pracy na dużych głębokościach. Doktorant przedstawił także zaawansowane technologie wspierające automatyzację monitoringu oraz sterowania procesami wydobywczymi, które umożliwiają zwiększenie bezpieczeństwa pracy oraz optymalizację wydajności operacyjnej. W analizie uwzględniono także kluczowe parametry systemów ścianowych oraz nowoczesne rozwiązania w zakresie monitorowania ciśnienia i geometrii obudowy umożliwiające predykcję zagrożeń, jak na przykład obwały i zawały skalne. W pracy znalazło się również odniesienie do nowoczesnych standardów i wymagań bezpieczeństwa, takich jak dyrektywa ATEX, co świadczy o kompleksowym podejściu do omawianego zagadnienia. Dobór literatury oraz zakres analizy są w pełni uzasadnione i stanowią podstawę do określenia celów pracy oraz obszaru badań własnych Autora. Mgr inż. Jagoda wykazał się umiejętnością krytycznego spojrzenia i syntetyzowania informacji, tworząc spójny obraz aktualnych wyzwań i potrzeb technologicznych związanych z automatyzacją i bezpieczeństwem pracy w kopalniach.

Rozdział trzeci zawiera kompleksowe omówienie technologii transmisji danych stosowanych w sieciach czujników monitorujących urządzenia górnicze. Autor analizuje rosnącą potrzebę odpowiedniej organizacji transmisji danych w rozbudowanych sieciach bezprzewodowych, aby zapewnić niezawodność działania, elastyczność konfiguracji oraz bezpieczeństwo eksploatacyjne, szczególnie w warunkach zagrożenia wybuchem. Opisuje podstawowe zagadnienia dotyczące algorytmów trasowania, przedstawiając podział, między innymi na algorytmy płaskie i hierarchiczne. Szczegółowo omawia także zastosowanie wybranych protokołów, dostosowanych do specyficznych ograniczeń sieci sensorycznych w środowisku górniczym. W drugiej części rozdziału Doktorant skupia się na zaawansowanych metodach trasowania, szczególnie na algorytmach opartych na inteligencji roju, takich jak Particle Swarm Optimization (PSO) i Ant Colony Optimization (ACO), które zapewniają wyższą wydajność i stabilność w sieciach dynamicznych. Podsumowując, mgr inż. J. Jagoda przedstawia wyniki badań symulacyjnych potwierdzające, że algorytmy inspirowane naturą cechują się lepszą przepustowością i stabilnością, niż tradycyjne algorytmy trasowania, co czyni je obiecującym rozwiązaniem w przypadku sieci monitorujących w wymagających warunkach kopalnianych.

Dobór zagadnień przedstawionych w tych dwóch rozdziałach jest prawidłowy i moim zdaniem pozwala na rekonstrukcję dotychczasowego stanu wiedzy w rozpatrywanym zakresie oraz stanowi solidną podstawę dla określenia obszaru badań własnych. Jest to także właściwa baza wiedzy do sformułowania własnego zagadnienia badawczego. Wachlarz prac analizowanych przez Doktoranta jest stosunkowo obszerny. Na zakończenie tej części pracy Autor przedstawia podsumowanie analizy dotychczasowego stanu wiedzy, co pozwoliło na ustalenie kryteriów obejmujących wszystkie niezbędne cechy użytkowe wymagane do spełnienia w przypadku użytkowania proponowanego rozwiązania w warunkach rzeczywistych. Analizowaną dotąd część rozprawy oceniam jako poprawną, choć mam drobne zastrzeżenia, co do interpunkcji, które uwidocznilem w tekście dostarczonego mi egzemplarza pracy. Poza tym nasuwają mi się jeszcze następujące uwagi i sugestie:

- 1) na początku rozdziałów drugiego i trzeciego jest tzw. tekst wiszący; to samo zresztą dotyczy rozdziałów 4, 5, 6 i 7;
- 2) brak próby wyraźnego zwerbalizowania **problemu naukowego**; praca doktorska ma być bowiem dziełem, w ramach którego należy rozwiązać problem naukowy;
- 3) z punktu widzenia komunikatywności tekstu dobrze byłoby, gdyby akronimy ważne dla rozpatrywanych zagadnień, np. ACO, PSO, BA, AODV, DSR, OLSR, były wyjaśnione w wykazie ważniejszych oznaczeń.

Zasadniczą część rozprawy z punktu widzenia etapów badania naukowego stanowią rozdziały 4, 5, 6 i 7, w których Autor referuje **metodykę, wyniki i analizę wyników badań własnych**.

Rozdział czwarty poświęcony jest procesowi prototypowania algorytmu trasowania sieci sensorycznej, z uwzględnieniem specyfiki monitoringu w środowisku górniczym. Autor opisuje strukturę i funkcjonalność sieci opartej o czujniki montowane na obudowach zmechanizowanych monitorujących kluczowe parametry, takie jak inklinacja, ciśnienie oraz odległość od czoła ściany wydobywczej. Wskazuje na konieczność przyjęcia odpowiedniej topologii sieci, aby zapewnić niezawodność i bezpieczeństwo transmisji danych w warunkach ograniczonej widoczności radiowej. Autor definiuje kryteria oceny algorytmu trasowania, uwzględniając czas dostarczenia pakietów, przepustowość, zużycie energii oraz współczynnik dostarczania pakietów, co stanowi podstawę do dalszej optymalizacji rozwiązań sieciowych. Doktorant wdrożył w modelu sieci sensorycznej zaawansowane algorytmy, takie jak optymalizacja rojem cząstek, algorytm mrówkowy oraz algorytm pszczele, aby zapewnić adaptację sieci do zmieniających się warunków oraz optymalizację trasowania pakietów. W rozdziale przedstawiono implementację algorytmów oraz metodykę przeprowadzenia badań na modelach sieciowych. W celu weryfikacji działania sieci zastosowano najpierw prosty model z trzema węzłami, a następnie wykonano testy na rozbudowanym prototypie składającym się z trzydziestu węzłów. Podejście metodyczne oceniam, jako trafne i przystające do założonego celu pracy.

W rozdziale piątym Autor referuje przygotowanie środowiska walidacyjnego składającego się z trzech węzłów, do uzyskania możliwości wstępnej walidacji algorytmu trasowania. Środowisko to zostało zbudowane z modułów radiowych nRF52, połączonych z komputerem PC za pomocą interfejsu USB oraz rozszerzone o mikrokomputery Raspberry Pi do odczytu danych diagnostycznych. Podczas walidacji mierzono kluczowe parametry, takie jak czas dotarcia pakietu do miejsca docelowego, przepustowość, pewność dostarczenia danych oraz zużycie energii węzłów sieci. W rozdziale szczegółowo omówiono wybór modułów radiowych oraz topologię sieci kratowej, zapewniającą wysoką odporność na awarie i optymalizację ścieżek przesyłania danych. Przedstawione zostało 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. Zastosowane rozwiązania umożliwiły realizację badań algorytmu trasowania z maksymalną liczbą 30 węzłów i były podstawą do dalszych badań. Rozdział zakończony jest syntetycznie ujętym bardzo zgrabnym podsumowaniem.

Rozdział szósty poświęcony jest przedstawieniu wyników walidacji i testów modelu sieci sensorycznej z trzema węzłami oraz prototypu sieci złożonej z trzydziestu węzłów, zgodnie z wcześniej przyjętą metodyką. Badania obejmowały pomiar czasu dotarcia pakietów, przepustowości, wartości PDR (ang. Packet Delivery Ratio) oraz poboru prądu przez poszczególne węzły. W wyniku wykonanych testów zaobserwowano różnice w efektywności poszczególnych algorytmów trasowania, przy czym algorytm optymalizacji rojem cząstek wyróżniał się najlepszą stabilnością transmisji danych. Wyniki testów wykazały również, że zaprojektowany system

adaptuje się do zmian struktury, zapewniając wysoką niezawodność i efektywność energetyczną, co potwierdza założenia pracy.

W rozdziale siódmym mgr inż. J. Jagoda przedstawił analizę wymagań dyrektywy ATEX (norma dotycząca urządzeń stosowanych w środowiskach zagrożonych wybuchem) koncentrując się na pracy sieci sensorycznych w strefach narażonych na wybuch metanu i pyłu węglowego. Opisane zostały konieczne wymagania dotyczące materiałów oraz konstrukcji obudów, m.in. trudnopalność, antyelektrostatyczność, nietoksyczność oraz wytrzymałość mechaniczna, które muszą być spełnione przez projektowane węzły. Autor szczegółowo omówił proces doboru i testowania obudów węzłów, w tym analizę różnych technologii wykonania obudów, takich jak obróbka na obrabiarkach CNC, druk 3D, formy silikonowe i formy wtryskowe. Wykonane zostały testy rezystancji powierzchniowej oraz wytrzymałości mechanicznej obudów. Badania te wykazały, że obudowy wykonane z odpowiednich materiałów w technologii druku 3D oraz w formach wtryskowych spełniają normatywne wymagania dyrektywy ATEX. Dodatkowo wykonana została analiza obwodów elektrycznych węzłów typu NODE i SINK pod kątem iskrobezpieczeństwa oraz zgodności z normami PN-EN 60079-11:2012 i PN-EN 60079-0:2013-03 zharmonizowanymi z dyrektywą ATEX. Obliczenia elementów zabezpieczających potwierdziły, że węzły spełniają kryteria ATEX. W rozdziale przedstawiono wnioski dotyczące możliwości wdrożenia systemu do pracy w warunkach podziemnych z zachowaniem bezpieczeństwa eksploatacyjnego.

Moje uwagi do tej części pracy są następujące:

- 1) podrozdział 4.1 – brak źródła przedstawianych zależności;
- 2) str. 38 – nie podano znaczenia symbolu w_3 ;
- 3) str. 47 - podana pozycja [89] nie istnieje w spisie literatury;
- 4) rozdział 5 – zrzuty z ekranu są mało czytelne;
- 5) str. 77 – w tabeli 9 jest 46 ms, a w tekście pracy Autor pisze, że średnie czasy dotarcia pakietu do miejsca docelowego mieściły się w przedziale od 34 ms;
- 6) tabela 28 nie jest powołana w tekście pracy;
- 7) tabele 31 i 32 – w opisie tabel występują dwie wielkości z indeksem dolnym w formie kwadratu, które trudno znaleźć w tych tabelach.

Poza tym chciałbym sformułować prośbę o dodatkowe wyjaśnienia o nieco ogólniejszym charakterze, które mogłyby być przedmiotem wypowiedzi doktoranta oraz dyskusji w trakcie obrony:

- 1) czy jest możliwe pokazanie autorskiego oprogramowania do monitoringu procesu walidacji algorytmu trasowania?
- 2) proszę przedstawić projekt obudowy przeznaczonej do badań, których wyniki zostały przedstawione w rozdziale siódmym.

Na podstawie przeprowadzonej dotąd analizy można podjąć próbę rekonstrukcji **osiągnięcia naukowego rozprawy**. Jako elementy tego osiągnięcia widocznie odróżniające je od aktualnego stanu wiedzy w rozpatrywanej problematyce i w przyjętym zakresie badań oraz świadczące o oryginalności rozprawy uważam:

- opracowanie autorskiego algorytmu trasowania sieci sensorycznych z zastosowaniem inteligencji roju;
- zastosowanie algorytmów pracujących w oparciu o inteligencję roju do trasowania danych w sieciach sensorycznych pracujących w strefach zagrożonych wybuchem;
- opracowanie środowiska walidacji sieci sensorycznych w tym:
 - opracowanie autorskiego oprogramowania G-MESH odczytującego, gromadzącego, wizualizującego i analizującego dane pomiarowe;
 - opracowanie wewnętrznego oprogramowania modułów NRF52 bazującego na stosie programowym FruityMESH;

- opracowanie oprogramowania na mikrokomputery typu Raspberry Pi odczytujące dane z węzłów typu SINK oraz NODE; zaimplementowanie obsługi protokołu MQTT;
- wdrożenie opracowanego algorytmu do sieci sensorycznej składającej się z 30 węzłów z bazowaniem na układach NRF52.

Na podkreślenie zasługuje to, że Autor zastosował w swojej pracy adekwatne do potrzeb narzędzia formalne dotyczące opracowania i analizy wyników. Mgr inż. Jerzy Jagoda wykazał się bardzo dobrym opanowaniem zagadnień w rozważanym przez siebie obszarze.

Rozdział ósmy zatytułowany jest *Podsumowanie i dalsze kierunki badań*. Autor w syntetycznym skrócie przedstawia osiągnięcia wynikające z realizacji pracy doktorskiej. Kluczowym efektem jest opracowanie algorytmu trasowania sieci sensorycznych umożliwiającego efektywne zarządzanie pracą sieci stosowanych w strefach zagrożonych wybuchem metanu i pyłu węglowego. Przedstawiona została także charakterystyka problemów dotyczących niezawodności pracy sieci oraz specyficzne wymagania normatywne zgodne z dyrektywą ATEX. Wyniki wykonanych badań wykazały, że sieć sensoryczna z zaimplementowanym algorytmem wykazuje się stabilnymi parametrami pracy, adaptacją do zmian struktury oraz niezawodnością w monitoringu sekcji obudowy zmechanizowanej. Podsumowując, Autor stwierdza, że cele pracy zostały osiągnięte, a założenia naukowe potwierdzone. Jednocześnie sugeruje konieczność dalszych badań w kierunku rozwoju algorytmu trasowania, w szczególności dostosowania jego działania do sieci z tysiącami węzłów, co jest istotne w kontekście rozwoju Przemysłu 5.0 i koncepcji IIoT w przemyśle wydobywczym. Z punktu widzenia komunikatywności tekstu oraz istoty pracy doktorskiej, jako dzieła, w ramach którego należy rozwiązać problem naukowy, lepiej byłoby, zgodnie z tradycją akademicką, aby podzielić wnioski na: dotyczące odpowiedzi na tezy pracy oraz wnioski poznawcze, utylitarne i dotyczące kierunku dalszych badań.

Co do całości tekstu nasuwają mi się jeszcze następujące uwagi:

1. zdarza się niewłaściwe używanie niektórych słów, np.: niższy, gdy lepiej byłoby mniejszy – np. na str. 87, 103; niski zamiast mały – str. 93; niższy, gdy lepiej byłoby krótszy – str. 103; gorsza, gdy lepiej byłoby mniejsza – str. 117; obniżenie zamiast skrócenie – str. 125.

Bibliografia zamieszczona w końcowej części rozprawy jest stosunkowo obszerna i zawiera łącznie 88 pozycji, w tym są najnowsze publikacje z literatury światowej oraz dziesięć pozycji z udziałem Autora ważnych dla problematyki niniejszej rozprawy doktorskiej. Niektóre pozycje, przede wszystkim te dotyczące artykułów w czasopismach, np. [22], [29], [33] są niekompletne.

3. Ogólna ocena rozprawy

Przedstawiona analiza rozprawy zawiera wystarczające, moim zdaniem przesłanki do sformułowania oceny. Treść rozprawy jest zgodna z tematem zaakceptowanym przez Radę Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna z Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej. Podjęty temat jest ważny zarówno z poznawczych, jak i praktycznych względów i opracowany został w sposób wyczerpujący. Sformułowane w niniejszej recenzji uwagi nie umniejszają wartości materiału dowodowego pracy, w większości albowiem odnoszą się do sposobu prezentacji uzyskanych wyników lub są kanwą do dyskusji z Autorem. Nie mogą więc stanowić podstawy do kwestionowania wartości pracy.

Pod względem metodycznym rozprawa jest poprawna. Literatura specjalistyczna została dobrana trafnie. Układ rozprawy i podział treści między poszczególne rozdziały jest logiczny. Zbiór pojęciowy, jakim posługuje się Autor, jest w zasadzie poprawny. Strona ilustracyjna pracy jest przeważnie dobrej jakości. Redakcja rozprawy jest poprawna. W dostarczonym do recenzji egzemplarzu stwierdziłem jednak nieliczne błędy korektorskie, interpunkcyjne i drobne nieścisłości. Najważniejsze z nich wyszczególniłem w poprzednim rozdziale.

Autor zastosował w swojej pracy właściwie dobrane narzędzia badawcze, odpowiednie do specyfiki i celów badań. Zakres badań własnych jest odpowiednio szeroki i kompleksowy. Doktorant przyjął również właściwe podejście metodyczne, które pozwala na pełną realizację założonych celów. Wiarygodność uzyskanych wyników została potwierdzona przez odpowiednią weryfikację.

Godna podziwu jest pracowitość doktoranta. Mgr inż. Jerzy Jagoda wykonał wartościową pracę badawczą i wykazał się dobrą znajomością warsztatu naukowego. W rozprawie zaplanował i wykonał prace rozpoznawcze i przygotowawcze oraz obszerne badania dotyczące kreowania i walidacji algorytmów trasowania sieci sensorycznych, w sposób czytelny przedstawił ich wyniki, wykonał analizę otrzymanych rezultatów opatrując je stosownymi komentarzami. Udowodnił zatem, że potrafi w skuteczny sposób wykonywać badania naukowe. Przedstawione wyniki badań mają również **walor praktycznego zastosowania**.

Warunkiem dysertabilności rozprawy doktorskiej jest jej związek z problemem metodologicznym, metodycznym lub poznawczym bezpośrednio lub pośrednio wpływającym na stan wiedzy. W przypadku recenzowanej rozprawy warunek ten jest spełniony pod względem drugiego i trzeciego aspektu, co wykazałem w przedstawionej analizie. Praca jest w wystarczającym stopniu poprawna metodologicznie, gdyż zawiera elementy, które w metodologii nauk określa się jako etapy badania naukowego.

Na podstawie analizy rozprawy można stwierdzić, że Doktorant jest przygotowany do prowadzenia samodzielnej pracy naukowej. Mgr inż. Jerzy Jagoda wydatnie poszerzył swoją ogólną wiedzę dotyczącą warsztatu badawczego w zakresie optymalizacji i zarządzania danymi w sieciach sensorów, szczególnie z perspektywy automatyzacji oraz poprawy bezpieczeństwa eksploatacji urządzeń i systemów górniczych, przede wszystkim, w strefach zagrożonych wybuchem metanu i pyłu węglowego. Poza tym wykazał się również bardzo znaczącą aktywnością, jeżeli chodzi o rozpowszechnianie wyników swoich badań przez publikacje w czasopiśmie naukowych. Na uznanie dodatkowo zasługują trzy zgłoszenia patentowe.

Podsumowując moją ocenę stwierdzam, że rozprawa:

- **spełnia wymóg oryginalnego rozwiązania przez Autora zagadnienia naukowego,**
- **spełnia wymóg wykazania ogólnej wiedzy teoretycznej w uprawianej dyscyplinie**
- **oraz wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia przez Autora pracy naukowej.**

4. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska jest oryginalnym osiągnięciem mgra inż. Jerzego Jagody i stanowi istotny wkład w rozwój badań w zakresie kreowania i walidacji algorytmów trasowania sieci sensorycznych umożliwiających efektywne zarządzanie pracą sieci stosowanych, między innymi, w strefach zagrożonych wybuchem metanu i pyłu węglowego.

W świetle dokonanej analizy i sformułowanych ocen stwierdzam, że rozprawa mgra inż. Jerzego Jagody pt. *Opracowanie oraz walidacja algorytmu trasowania sieci sensorycznych z zastosowaniem inteligencji roju* spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące w tym względzie aktualne przepisy (ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668)) oraz tradycję akademicką i może stanowić podstawę do nadania jej Autorowi stopnia naukowego doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie *Inżynieria mechaniczna*. Może być przeto dopuszczona do publicznej obrony.

