

# **Recenzja rozprawy doktorskiej**

**Imię i nazwisko kandydata: Adam Kozłowski**

**Tytuł rozprawy doktorskiej:**

**Adaptacyjne zarządzanie komunikacją w przemysłowych, bezprzewodowych sieciach  
Internetu Rzeczy (IoT)**

**Promotor: prof. dr hab. inż. Janusz Sosnowski**

**Recenzent: dr hab. inż., prof. IITIS PAN Krzysztof Grochla**

## 1. Wybór tematu i cel pracy

Rozprawa dotyczy problemu optymalizacji konfiguracji bezprzewodowych sieci przemysłowych w celu spełnienia wymagań jakościowych QoS. W rozprawie poddano analizie zestaw modeli, metod oraz algorytmów opracowanych przez autora, pozwalających na adaptacyjny dobór parametrów konfiguracyjnych, z uwzględnieniem ograniczonych zasobów dostępnych w węzłach sieci. W rozprawie także przeanalizowano problem synchronizacji czasu w węzłach sieci bezprzewodowej.

Wybór tematyki rozprawy został dobrze umotywowany, a praca dotyczy realnego problemu występującego w sieciach bezprzewodowych używanych w zastosowaniach przemysłowych. Niezawodna komunikacja pomiędzy urządzeniami w środowisku przemysłowym jest niezbędna do poprawnego działania systemów automatyki przemysłowej i telemetrii. Problem badawczy dobrze wpisuje się w koncepcję Przemysłu 4.0 oraz w nowe trendy związane z zastępowaniem sieci przewodowych przez łącza bezprzewodowe o dużej niezawodności. Doktorant poprawnie zauważa, że wymagania QoS dotyczące wysokiej niezawodności, determinizmu czasowego oraz niskiego zużycia energii powodują, że rozwiązania wykorzystujące scentralizowane zarządzanie są częściej stosowane w sieciach przemysłowych, dlatego dobrze, że rozprawa koncentruje się na tego typu architekturze.

Opis problemu badawczego zawarty w rozdziale 3 jest precyzyjny i szczegółowy. W rozdziale 3.1 Doktorant w sposób klarowny definiuje pojęcia związane z wymaganiami QoS używane dalej w pracy. Przyjęte definicje i metody określania wymagań czasowych i niezawodnościowych są zgodne z terminologią przyjętą w dziedzinie. Pewne zastrzeżenie może jedynie budzić przyjęte w sposób niejawnym założenie, że prawdopodobieństwo dostarczenia ramki jest stałe w czasie, a prawdopodobieństwo dostarczenia ramki zależy jedynie od bitowego współczynnika błędu (BER) i prawdopodobieństwa poprawnego rozpoczęcia transmisji. W praktyce takie założenie nie jest w pełni poprawne, ponieważ współczynnik BER zmienia się w czasie oraz współczesne protokoły transmisji stosują kodowanie nadmiarowe zapewniające odporność na ograniczoną liczbę przekłamań poszczególnych bitów. Jednak są to uproszczenia konieczne do przyjęcia dla zapewnienia czytelności pracy. W kolejnych podrozdziałach Doktorant zdefiniował format kontraktu QoS oraz przyjęty definicji sposobu komunikacji cyklicznej i sekwencyjnej. Bardzo dobrze, że Doktorant korzysta w pracy ze standardów, jak np. ISA100.11a określającego zawartość kontraktów QoS. Formalna definicja problemu optymalizacyjnego przedstawiona w podrozdziale 3.2.4 jest poprawna, a warunki i kryteria optymalizacji zostały jednoznacznie zdefiniowane.

Podsumowując, wybór tematu został dobrze umotywowany, a cel pracy został jasno zdefiniowany i dotyczy realnego problemu występującego we współczesnych sieciach bezprzewodowych.

## 2. Analiza źródeł i stanu wiedzy

W rozprawie doktorskiej przegląd literatury ujęto po części w rozdziale 1.1 (w odniesieniu do definicji problemu) oraz w rozdziałach 3.1, 5.1, 6.1 w odniesieniu do problemów rozważanych w tych rozdziałach. Przegląd literatury naukowej obejmuje 123 pozycje, z których wszystkie zostały zacytowane w odpowiednim kontekście. Autor dobrze przedstawił stan wiedzy w zakresie protokołów dla przemysłowych sieci bezprzewodowych i problemów optymalizacyjnych związanych z zapewnieniem QoS w takich sieciach. Wybór prac, do których Doktorant odwołuje się w opisie modeli łącza radiowego (rozdział 3.1), metod planowania szczelin czasowych transmisji (rozdział 5.1) i algorytmów genetycznych (rozdział 6.1) jest wyczerpujący i adekwatny do tematyki badań podjętych w rozprawie.

Założenia przyjęte w rozprawie są w większości dobrze umotywowane przez odniesienia do literatury. Doktorant bardzo dobrze opisał wymagania i założenia algorytmów doboru szczelin czasowych, a konieczność opracowania nowych metod została poparta adekwatnymi referencjami do stanu wiedzy. Dobrze także uzasadniono założenia przyjęte podczas badań funkcji synchronizacji czasu. Również uzasadnienie dla potrzeby tworzenia własnej metody optymalizacji procesu konfiguracji bezprzewodowych sieci przemysłowych jest poprawne, lecz pewnym niedopatrzeniem ze strony doktoranta jest stwierdzenie, iż „brak jest w literaturze opracowań dotyczących efektywnych metod konfiguracji poszczególnych warstw w sposób pozwalający na optymalizację działania całej sieci”, które nie zostało bezpośrednio poparte odniesieniami do literatury. Biorąc pod uwagę całość pracy, to zakres zrealizowanych badań i uzasadnienie podjętych metod badawczych jest dobrze umotywowane odniesieniami do literatury naukowej.

## 3. Metodyka i sposób rozwiązania problemu badawczego

Autor szczegółowo opisał przyjętą metodykę i koncepcję badań eksperymentalnych. Doktorant przygotował dedykowane środowisko testowe, które składa się z generatora topologii, oprogramowania realizującego algorytm przydziału slotów czasowych i symulatora transmisji danych w sieci IWN. Przyjęte metody generacji topologii sieci zostały dobrze oparte na wynikach prac naukowych w dziedzinie. Autor nie wykorzystał istniejących generatorów topologii (jak np. BRITE), ale stworzył własne narzędzie, co pozwoliło mu na generowanie grafów odpowiadających wymaganiom dalszych etapów prac. Przygotowane środowisko symulacyjne także zostało przygotowane w sposób poprawny, umożliwiającą rzetelną ocenę efektywności działania sieci przy założonym sposobie przydziału szczelin czasowych. Jednak w rozprawie brak jest wystarczająco szczegółowych informacji na temat sposobu weryfikacji poprawności działania środowiska symulacyjnego. Doktorant także nie umotywował należyście, dlaczego opracował własne narzędzie, a nie skorzystał z istniejących i dobrze przetestowanych symulatorów zdarzeń dyskretnych, jak np. OMNeT++. Biorąc pod uwagę duży zakres badań opisanych w pracy, te niewielkie braki w opisie są uzasadnione, ze względu na konieczność zachowania zwięzłości rozprawy. Środowisko badawcze zostało przygotowane w sposób poprawny, a jego opracowanie wymagało dużego nakładu pracy ze strony Doktoranta.



Pierwszym elementem badawczym pracy jest autorski model i metoda kompensacji rozbieżności wskazań układów zegarowych węzłów sieci opisana w rozdziale 2. Model może działać w 2 trybach: liniowym i wykładniczym, które pozwalają obliczyć przesunięcie zegarów w odpowiedzi na wykrytą zmianę temperatury. Doktorant przeprowadził badania eksperymentalne i symulacyjne potwierdzające, że opracowana metoda pozwala na skuteczną korektę niedoskonałości pomiaru czasu, nawet przy zastosowaniu czujnika temperatury o niskiej dokładności. Eksperymenty potwierdziły, że maksymalne przesunięcie czasowe po zastosowaniu opracowanej metody kompensacji zegarów jest o rząd wielkości niższe, niż podczas pracy bez opracowanego algorytmu kompensacji. Opracowany algorytm potwierdza zdolność Doktoranta do rozwiązywania problemów synchronizacji czasu, a metody walidacji dokładności opracowanego algorytmu zostały bardzo dobrze dobrane.

Najistotniejszym elementem badań zrealizowanych w ramach rozprawy są zaproponowane przez autora 2 nowe algorytmy przydziału szczelin czasowych dla sieci ISW: CAS-PERIOD i CAS-SEQ. Prace nad tymi algorytmami zostały przeprowadzone bardzo rzetelnie, a sposób ich opracowania jest wzorcowy. Doktorant rozpoczął od przeglądu literatury i analizy dostępnych, opracowanych wcześniej algorytmów harmonogramowa transmisji w sieciach kratowych. W rozdziale 5 szczegółowo opisał wady i zalety istniejących algorytmów. Wybrał do pogłębionej analizy algorytmy najbardziej odpowiadające wymaganiom postawionego problemu badawczego: AMUS (Adaptive Multi-hop Scheduling Method) i algorytm planowania szczelin z metrykami LLF lub EDF. Autor bardzo dokładnie przeanalizował działanie obydwu w/w metod i wskazał najważniejsze ograniczenia istniejących metod. Następnie poprawnie umotywowował konieczność opracowania nowego rozwiązania i opisał sposób opracowania autorskich algorytmów oraz założenia do ich budowy. W kolejnym etapie przedstawił formalną definicję algorytmów CAS-PERIOD i CAS-SEQ. Opracowane algorytmy cechują się bardzo wydajnym działaniem – algorytm wykonania planu szczelin czasowych TDMA/FDMA w zakresie kontraktów dotyczących ruchu cyklicznego CAS-PERIOD działa w czasie poniżej 1s dla sieci złożonej ze 100 węzłów. Przyjęty sposób budowy algorytmów został szczegółowo opisany, a wszystkie kroki są należycie umotywowane. Autor przebadął obydwa opracowane algorytmy potwierdzając, że ich połączenie pozwala na poprawny przydział szczelin czasowych dla transmisji periodycznych (algorytm CAS-PERIOD) i sekwencyjnych (CAS-SEQ). Sposób analizy jest poprawny, a przyjęte pewne uproszczenia (np. pominięcie w analizie problemu konieczności transmisji wyniku działania algorytmu do poszczególnych węzłów sieci) są uzasadnione ze względu na czytelność pracy.

Ostatnim elementem podsumowującym zrealizowane badania i potwierdzającym umiejętność rozwiązania zdefiniowanego problemu badawczego jest podjęcie przez Doktoranta dyskusji nad analizą możliwości wykorzystania algorytmów genetycznych do doboru konfiguracji sieci. Metodyka zastosowania algorytmów genetycznych do rozwiązania problemu jednoczesnego doboru trasy i przydziału szczelin czasowych jest poprawna. Algorytmy genetyczne bardzo dobrze sprawdzają się w rozwiązywaniu złożonych problemów optymalizacji wielokryterialnej, w której funkcja celu ma charakter niemonotoniczny, są więc dobrze dobrane pod kątem rozwiązywanego problemu. Doktorant poprawnie przygotował reprezentację problemu w postaci fenotypu, łącząc problem doboru tras routingu ze zbiorem harmonogramów transmisji. Dobrze także zdefiniował sposób mutacji i wyliczenia funkcji przystosowania. Badania wydajnościowe potwierdziły, że czas realizacji optymalizacji jest akceptowalny i nie przekracza dziesiątek sekund nawet dla sieci złożonych z 200 węzłów.



Podsumowując, autor wykazał w części badawczej rozprawy, że potrafi dobrze dobrać narzędzia badawcze, rozwiązać postawiony problem optymalizacyjny i algorytmiczny, zaplanować badania oraz potrafi prawidłowo zebrać i przeanalizować wyniki ekspertów.

#### 4. Oryginalność rozprawy

Do najważniejszych osiągnięć naukowych doktoranta należy zaliczyć:

- definicja problemu optymalizacji konfiguracji bezprzewodowej sieci przemysłowej oraz analizę wymagań QoS związanych z czasem transmisji i jej niezawodnością
- oryginalna metoda charakteryzacji profili zużycia energii
- opracowanie 2 autorskich algorytmów: CAS-PERIOD i CAS-SEQ przygotowywania planu aktywności węzłów (szczelin czasowych) w sieciach TDMA/FDMA.
- całościowe rozwiązanie zdefiniowanego problemu optymalizacji konfiguracji bezprzewodowej sieci przemysłowej, wykorzystujące autorską metodę zastosowania algorytmów genetycznych do optymalizacji połączenia doboru trasy z przydziałem szczelin czasowych GA-CAS

Badania przeprowadzone w trakcie prac nad rozprawą doktorską są oryginalne i wykraczają poza stan wiedzy we wszystkich w/w obszarach. W szczególności:

- Doktorant opracował nową metodę synchronizacji zegarów, przygotował własne środowisko badawcze do testowania algorytmów przydziału szczelin czasowych i opracował 2 nowe propozycje algorytmów przydziału takich szczelin. Prace te w poprawny sposób wykorzystują wyniki poprzednich badań, jednocześnie wykraczają poza stan wiedzy w istotny sposób.
- Algorytmy przydziału szczelin czasowych dla transmisji periodycznych i sekwencyjnych są nowe i stanowią oryginalny wkład autora w stan wiedzy. Zapewniają efektywniejszy przydział szczelin w wielohopowych sieciach bezprzewodowych niż wcześniej stosowane algorytmy i mogą znaleźć zastosowanie w kratownicowych sieciach bezprzewodowych (ang. mesh network) o stałej topologii.
- Istotnym wkładem rozprawy w stan wiedzy jest także propozycja zastosowania algorytmów genetycznych do optymalizacji procesu konfiguracji sieci IWN. Metoda zastosowania algorytmów genetycznych do rozwiązania problemu jednoczesnego przydziału szczelin czasowych i harmonogramu transmisji jest oryginalnym rozwiązaniem autora i potwierdza umiejętność Doktoranta do zastosowania znanych w literaturze metod do rozwiązania nowych klas problemów.

Wyniki rozprawy mają bezpośrednie zastosowanie w przemyśle. Opracowane algorytmy przydziału szczelin czasowych i synchronizacji czasu mogą zostać zastosowane w projektowaniu i budowaniu bezprzewodowych sieci przemysłowych. Pewnym ograniczeniem dla możliwości zastosowania opracowanych metod jest konieczność wdrożenia systemu optymalizacji i zapewnienia niewielkiej zmienności topologii sieci. Jednak rozwiązanie problemu przydziału szczelin czasowych i optymalizacji konfiguracji sieci IWN zaproponowane przez doktoranta może nie tylko znaleźć bezpośrednie zastosowanie w sieciach

przemysłowych, ale także stanowić inspirację do dalszych badań w naukach inżyniersko-technicznych, np. związanych nadążnym sterowaniem przydziałem szczelin czasowych w odpowiedzi na zmiany wymagań QoS lub zmiany topologii sieci.

## 5. Poprawność redakcyjna rozprawy

Rozprawa składa się z 7 rozdziałów, spisu literatury oraz czterech dodatków zawierających rozszerzoną dokumentację przeprowadzonych badań. Struktura pracy jest przejrzysta i klarowna. Podział rozprawy na rozdziały uwzględnia spójność tematyczną prac realizowanych na poszczególnych etapach i jest czytelny. Praca jest napisana w sposób staranny i jest poprawna pod względem językowym. Doktorant bardzo precyzyjnie definiuje wszystkie używane symbole i oznaczenia.

W pracy brak jest poważnych błędów redakcyjnych lub językowych. Użyta terminologia jest poprawna i spójna z używaną w literaturze naukowej dziedziny, zastrzeżenia jedynie budzi wykorzystanie jednostek w rozdziale 2.1.2: autor używa do opisu przepływności transmisji jednostki bod/s, podczas gdy z definicji 1 bod oznacza 1 symbol przesyłany przez 1 s. Przepływności wymienionych w tym rozdziale układów powinny być raczej określone w bodach lub w bitach / sekundę. Wystąpienie tego drobnego błędu nie umniejsza jednak ogólnej bardzo wysokiej oceny poziomu redakcyjnego rozprawy.

Wyniki przedstawione w rozprawie są opisane w sposób klarowny. Wszystkie zawarte w pracy wykresy są oparte stosownym komentarzem i poprawnie zinterpretowane. Doktorant wydzielił część wykresów i umieścił je w dodatku do pracy, co nieznacznie utrudnia odniesienie się do nich w trakcie czytania rozprawy, ponieważ interpretacja rezultatów eksperymentów została przedstawiona wewnątrz samej rozprawy. Przyjęty sposób prezentacji jest jednak częściowo uzasadniony, ponieważ wpłynął na zmniejszenie objętości pracy i pozwolił uniknąć dłuższych fragmentów obejmujących jedynie wykresy i ilustracje w ramach samej pracy.

Podsumowując, autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników.

## 6. Uwagi krytyczne

Przyjęta koncepcja badań eksperymentalnych opiera się na zastosowaniu autorskiego środowiska do analizy wpływu różnych parametrów na proces tworzenia konfiguracji sieci. Opracowano także własny symulator generujący pakiety zgodnie z definicją kontraktów. W pracy jednak nie opisano w wystarczającym stopniu, w jaki sposób opracowany symulator został zweryfikowany i przetestowany oraz dlaczego nie zdecydowano się na wykorzystanie istniejących symulatorów zdarzeń dyskretnych, w których zaimplementowano model sieci bezprzewodowych, jak np. NS3 lub OMNeT++.

W pracy brak jednoznacznego odniesienia do protokołów transmisji danych, które są wykorzystywane w sieci dla której odbywa się przydział szczelin czasowych za pomocą



opracowanych algorytmów. Choć część pracy odnosi się do standardów WirelessHART lub IEEE 802.15.4, to brak jednoznacznej informacji, w jaki sposób opracowana metoda przydziału szczelin czasowych może zostać wykorzystana w tych 2 protokołach. W jaki sposób jest przesyłana informacja o decyzji algorytmu z węzła realizującego optymalizację do poszczególnych węzłów sieci?

Symulowane transmisje danych odbywają się z wykorzystaniem topologii wygenerowanej w środowisku badawczym, przy założeniu jej niezmienności w czasie eksperymentu. Jednak transmisje pakietów w tych samych szczelinach czasowych mogą stanowić źródło zakłóceń lub być odbierane jako większy szum dla węzłów niepołączonych w grafie, a jedynie znajdujących się w pobliżu. Dodatkowo, topologia sieci bezprzewodowych ulega nieustannym zmianom, nawet w przypadku zastosowania węzłów stacjonarnych, ze względu na zmiany środowiska – np. pojazd zatrzymujący się pomiędzy 2 węzłami może tak zwiększyć tłumienność łącza, że bezpośrednia komunikacja nie będzie możliwa. Czy uwzględniono wpływ takich zmian topologii oraz zakłóceń pomiędzy węzłami bardziej odległymi w symulowanym grafie niż 2 krawędzie? W opisie badań trudno także doszukać się informacji na temat wpływu innych transmisji występujących w tym samym paśmie na symulowane transmisje, co ma istotne znaczenie ze względu na powszechne wykorzystanie pasma ISM w badanych sieciach.

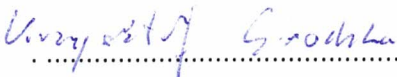
## 7. Podsumowanie i ocena końcowa

Praca doktorska pt. „Adaptacyjne zarządzanie komunikacją w przemysłowych, bezprzewodowych sieciach Internetu Rzeczy (IoT)” została przygotowana przez magistra inżyniera Adama Kozłowskiego bardzo rzetelnie i potwierdza zdolność kandydata do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Praca jest poprawna pod względem metodologicznym, a opracowane algorytmy przydziału szczelin czasowych oraz metoda doboru konfiguracji przemysłowych sieci bezprzewodowych są rozwiązaniami innowacyjnymi, wykraczającymi poza stan wiedzy. Badania zostały poprawnie zaplanowane i zrealizowane, a ich wyniki szczegółowo i precyzyjnie opisane. Praca tym samym potwierdza, iż kandydat posiada wymaganą wiedzę teoretyczną w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja.

Ja, niżej podpisany stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska magistra inżyniera Adama Kozłowskiego spełnia warunki określone w art. 187 ust. 1 i 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 r., poz. 1668 z późn. zmianami) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja o dopuszczenie Pana Adama Kozłowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

12.09.2022

.....  
data sporządzenia recenzji

  
.....  
podpis recenzenta