

RADA NAUKOWA DYSCYPLINY
INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ
zaprasza na
PUBLICZNĄ OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Adama Kozłowskiego

która odbędzie się w dniu **10.10.2022 roku**, o godzinie **12:00** w trybie zdalnym

Temat rozprawy:

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

Promotor: prof. dr hab. inż. Janusz Sosnowski – Politechnika Warszawska

Recenzenci: dr hab. inż. Krzysztof Grochla, profesor IITIS PAN,

dr hab. inż. Przemysław Ignaciuk, profesor uczelni – Politechnika Łódzka

Obrona odbędzie się zdalnie na platformie MS Teams. Osoby zainteresowane uczestnictwem w obronie proszone są o zgłoszenie chęci uczestnictwa w formie elektronicznej na adres sekretarza komisji: dr. hab. inż. Krzysztofa Cabaja – email: krzysztof.cabaj@pw.edu.pl, do dnia 7.10.2022 godz. 18:00.

Z rozprawą doktorską i recenzjami można zapoznać się w Czytelni Biblioteki Głównej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Plac Politechniki 1.

Streszczenie rozprawy doktorskiej i recenzje są zamieszczone na stronie internetowej: <https://www.bip.pw.edu.pl/Postepowania-w-sprawie-nadania-stopnia-naukowego/Doktoraty/Wszczete-do-30-kwietnia-2019-r/Dyscyplina-informatyka-techniczna-i-telekomunikacja-dziedzina-nauk-inzynieryjno-technicznych/mgr-inz.-Adam-Kozlowski>

Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja
Politechniki Warszawskiej
dr hab. inż. Jarosław Arabas, prof. uczelni

Streszczenie

Bezprzewodowe sieci przemysłowe (industrial wireless networks, IWN) zyskują na znaczeniu w związku z rozwojem Przemysłu 4.0. Autonomiczna wymiana informacji bezpośrednio pomiędzy węzłami sieci i odejście od hierarchicznej struktury procesów automatyzacji wymagają efektywnych metod adaptacyjnej optymalizacji konfiguracji IWN pozwalających na wypełnienie stawianych wymagań jakościowych (QoS).

W rozprawie sformułowano problem optymalizacyjny znalezienia między warstwowej konfiguracji IWN w oparciu o zgłaszane kontrakty, wymagania jakościowe QoS (tj. maksymalny czas transmisji, niezawodność, żywotność, przepływność) oraz raporty dotyczące połączeń z sąsiednimi węzłami. Opracowano i poddano analizie zestaw autorskich modeli, metod oraz algorytmów pozwalających na adaptacyjny dobór parametrów konfiguracyjnych w sieciach IWN z węzłami o ograniczonych zasobach (układowych i energetycznych). Charakter opracowania jest uniwersalny ale przyjęte, w badanych implementacjach, definicje (kontraktów, parametrów QoS, priorytetów, rodzajów ruchu) są zgodne ze standardem ISA100.11a. Otrzymane rezultaty mają wymiar praktyczny co zostało potwierdzone w ramach projektu badawczo-rozwojowego RPMA.01.02.00-14-9551/17-00.

Rozwiązanie postawionego problemu optymalizacyjnego wymagało opracowania autorskiej metody wykorzystującej heurystyczny algorytm GA-CAS oraz algorytmy planowania szczelin czasowych dla ruchu cyklicznego CAS-PERIOD oraz sekwencyjnego CAS-SEQ. Zaproponowany algorytm GA-CAS wykorzystuje algorytm genetyczny wraz z autorską metodą oceny. Algorytmy CAS-PERIOD i CAS-SEQ wykorzystują opracowany mechanizm planowania przydziału szczelin czasowych unikający kolizji (CAS) bez konieczności wykonywania planu w długim okresie (wynikającym z wielokrotności okresów kontraktów).

Założenie dotyczące ograniczonych zasobów węzłów IWN wymagało autorskiego podejście w wielu aspektach. Opracowano uniwersalny model energetyczny sieci IWN bazując na pomiarach typowego układu i uwzględniono go w opracowanej metodzie optymalizacyjnej w kontekście czasu obowiązywania kontraktu. Opracowano metodę oraz algorytmy ograniczające wpływ dryftu zegara czasu rzeczywistego (składowa jitter) w przypadku gwałtownych zmian temperatury. W ramach badań przeprowadzono szereg eksperymentów fizycznych oraz symulacyjnych. Do tego opracowano specjalne środowiska sprzętowe oraz programowe i bogaty zestaw testów, które pozwoliły ocenić opracowane rozwiązania w porównaniu z innymi.

Słowa kluczowe: bezprzewodowe sieci przemysłowe, wymagania jakościowe, algorytmy optymalizacyjne, konfiguracja sieci, problemy energetyczne, badania symulacyjne

dr hab. inż. Przemysław Ignaciuk, prof. uczelni

Politechnika Łódzka

Wydział Fizyki Technicznej, Informatyki i Matematyki Stosowanej

ul. Wólczańska 215

93-005 Łódź

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Adama Kozłowskiego, pt.

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

Niniejsza recenzja została przygotowana w odpowiedzi na pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Informatyki Technicznej i Telekomunikacji Politechniki Warszawskiej dr. hab. inż. Jarosława Arabasa, prof. uczelni z dnia 29 czerwca 2022 r.

1. Zakres i cel rozprawy

Przedmiotem rozprawy jest optymalizacja konfiguracji bezprzewodowych sieci przemysłowych (Industrial Wireless Networks – IWN), aby dostarczyć efektywną platformę komunikacji między węzłami o ograniczonych zasobach. W świetle szerokiego spektrum rozważań naukowych i wyzwań praktycznych związanych z wdrożeniem inteligentnych systemów tzw. Przemysłu 4.0 oraz Internetu Rzeczy tematyka rozprawy jest wysoce aktualna. Autor podjął się opracowania modeli i algorytmów organizacji ruchu w sieciach IWN z gwarancją poziomu jakości usługi (Quality of Service – QoS), wymaganego dla realizacji postawionego przez współpracujące ze sobą urządzenia celu. Rozważania skoncentrował na układach pracujących w schemacie scentralizowanym, tj. z planistą decydującym o przydziale zasobów komunikacyjnych na podstawie analizy bieżąco realizowanych zadań oraz zmiennych warunków pracy sieci i otoczenia przemysłowego, stanowiącego dodatkowe źródło zakłóceń. Dla rozpatrywanej klasy układów sformułował oryginalne algorytmy deterministycznego przydzielania szczelin czasowych dla różnych klas ruchu, które następnie rozszerzył i uogólnił do postaci kompleksowego systemu decyzyjnego opartego na algorytmie genetycznym. Przedstawiony system został poddany wyczerpującej analizie numerycznej i eksperymentalnej nie tylko w wirtualnym środowisku symulacyjnym, ale również przy użyciu fizycznych urządzeń, wytworzonych w kierowanym przez Autora projekcie badawczo-rozwojowym, finansowanym w ramach programu RPMA.01.02.00-14-9551/17-00.

Teza rozprawy: Zaproponowany adaptacyjny dobór parametrów konfiguracyjnych w sieciach IWN z węzłami o ograniczonych zasobach, pozwala na kompleksowe wypełnienie wielowymiarowych wymagań jakościowych QoS oraz optymalizację zawieranych kontraktów komunikacyjnych.

Zawartość rozprawy odpowiada zakresem tezie, a przeprowadzone i udokumentowane w pracy badania pozwalają wnioskować o jej prawdziwości.

2. Zawartość rozprawy

Rozprawa zawiera siedem rozdziałów, wykaz literatury i materiały dodatkowe w postaci czterech załączników, łącznie 173 strony maszynopisu. Rozszerzoną dokumentację przeprowadzonych badań udostępniono na nośniku elektronicznym.

Po podaniu streszczenia pracy w języku polskim i angielskim Autor przechodzi w rozdziale 1 do nakreślenia przedmiotu rozważań. Prezentuje genezę powstania pracy i motywację wyboru tematu na bazie wstępnego przeglądu literatury. Następnie formułuje cele i tezę rozprawy oraz określa zakres badań. W końcowej części omówiono układ dokumentu.

Rozdział 2 poświęcono zagadnieniom zużycia energii i synchronizacji czasu w układzie rozproszonym. Szczegółowo opisano sposób ustalania profilu energetycznego dla rozpatrywanej klasy urządzeń, obejmującego fizyczny pomiar mocy chwilowej przy typowych czynnościach związanych ze zmianą stanu urządzenia, m. in. przejście do stanu aktywnego i uśpięnego, wysyłaniem i odbiorem danych oraz wykonywaniem sekwencji komend radiowych. Dalej, w sekcji 2.2, omówiono zjawisko dryfu (zegara) w urządzeniach bazujących na oscylatorach kwarcowych i wpływ temperatury na przesunięcie i zmianę długości okna nadawczo-odbiorczego. Zaproponowano autorski algorytm niwelowania zakłóceń w synchronizacji szczelin czasowych i porównano go w badaniach symulacyjnych z rozwiązaniem wzorcowym z bieżącej literatury.

W rozdziale 3 scharakteryzowano rozważaną klasę układów sieciowych i powiązania parametrów sieci z wymaganiami jakościowymi transmisji ujętymi w ramach kontraktu, w ścisłym związku z możliwościami dokonywania pomiarów, a co za tym idzie wyznaczenia miar, przez fizyczne urządzenia. Dla tak zbudowanego modelu sformułowano problem optymalizacji i omówiono koncepcje jego rozwiązania. Na podstawie precyzyjnych odniesień do literatury złożoność problemu określono jako NP-zupełny, co dla Autora stanowi motywację do wykorzystania inteligencji obliczeniowej do wyznaczenia funkcji celu i składowych konfiguracji sieci.

W rozdziale 4 zaprezentowano przygotowane przez Autora dedykowane środowisko testowe służące weryfikacji proponowanych algorytmów. Opisano zasadę działania symulatora i sposób tworzenia konfiguracji na podstawie zdefiniowanych wektorów

testowych, a także reguły obsługi zdarzeń w odniesieniu do generowanego ruchu sieciowego.

Rozdział 5 poświęcono algorytmom przygotowywania planu aktywności węzłów w sieciach ze zwielokrotnieniem czasowo-częstotliwościowym. W pierwszej kolejności opisano klasyczne rozwiązania rozpatrywane w rozważanej klasie problemów. Poddane je skrupulatnej analizie formalnej oraz eksperymentalnej przy pomocy opisanego w rozdziale 4 środowiska testowego i zaproponowano stosowne modyfikacje. Na bazie wskazanych ograniczeń sformułowano autorskie algorytmy unikania kolizji dla ruchu cyklicznego i sekwencyjnego. Zaprojektowane algorytmy porównano z wzorcowymi rozwiązaniami z literatury przedmiotu i wykazano ich przewagę w badanej grupie sieci IWN.

W rozdziale 6 zaprezentowano kompleksowe rozwiązanie algorytmiczne, bazujące na algorytmie genetycznym, służące rozwiązaniu postawionego w rozdziale 3 problemu optymalizacji. Omówiono mapowanie pojęć i parametrów sieci na odpowiadające im elementy algorytmu genetycznego, a następnie przedyskutowano wybór operacji selekcji, krzyżowania i mutacji z autorskimi modyfikacjami odnoszącymi się do rozważanej klasy układów. Nacisk położono na dobór metod, które pozwalają zbliżyć się do rozwiązania optymalnego w jak najkrótszym czasie. Następnie przeprowadzono szereg eksperymentów pozwalających ocenić wpływ proponowanych ulepszeń i modyfikacji na jakość rezultatów i czasochłonność obliczeń.

Rozdział 7 zawiera podsumowanie. Oprócz syntetycznego omówienia głównych osiągnięć pracy nakreślono kierunki dalszych badań. Dodatkowe rysunki i wykresy ilustrujące zgromadzone dane umieszczono w dodatku na końcu maszynopisu.

Literatura obejmuje 123 pozycje. W większości są to odwołania do aktualnych prac z periodyków o uznanej, światowej renomie w dziedzinie informatyki i telekomunikacji oraz wiodących konferencji. Nie zabrakło też odniesień do dokumentacji i standardów technicznych. Materiał źródłowy został dobrany i wykorzystany właściwie.

3. Uwagi

Podczas lektury tekstu pracy nasunęło się kilka uwag i spostrzeżeń:

1. W rozdziale 2.2 przedstawiono interesujące aspekty analizy zjawisk zachodzących w układach sieciowych, często, niesłusznie, pomijane w literaturze. Przedstawiony wywód jest jednak niepełny. Przy omawianiu autorskiego algorytmu, wskazanie wzoru ze źródła zewnętrznego (artykułu), bez przytoczenia go w tekście rozprawy, choć precyzyjne, zaburza spójność wyводу. Chyba lepiej byłoby przedstawić w rozprawie stosowne wyprowadzenie, być może kosztem detali technicznych sekcji eksperymentalnej. Zdecydowanie brakuje sformalizowanego opisu działania prezentowanego algorytmu, np. w postaci schematu blokowego.

2. Podobnie jak w rozdziale 2, wydzielenie kluczowych dla wyjaśnienia opisywanych zjawisk ilustracji, np. rysunek B.1, poza główny tekst rozprawy pogarsza czytelność. Lekturę dodatkowo utrudnia częste odwoływanie się do elementów z załączników i materiałów z nośnika CD.

W konsekwencji, na przykład w odniesieniu do sytuacji zobrazowanej na rysunku B.1, nie jest jasne – brak m. in. numeracji węzłów – czy dotyczy ona transmisji pojedynczej ramki, czy zbioru ramek w ramach pakietu? Definicja swobody w planowaniu schematu transmisji dla ramki określonej wzorem (5) też nie jest klarowna. Przydałaby się ilustracja graficzna, być może analogiczna do rysunku B.1.

3. Zbudowane na potrzeby przeprowadzenia badań eksperymentalnych środowisko zostało opisane dość dokładnie. Warto byłoby jednak doprecyzować, czy i w jaki sposób opracowane scenariusze uwzględniają mobilność uczestników komunikacji (węzłów sieci)?
4. Przy projektowaniu algorytmu genetycznego Autor zwrócił uwagę na konieczność skrócenia czasu obliczeń i zaproponował modyfikacje klasycznej jego postaci prowadzące do tego celu. Aby uzyskać szybszą zbieżność w złożonych, realnych zadaniach optymalizacji często wybiera się metody sztucznej inteligencji z wbudowanym mechanizmem elityzmu, np. Biography-based optimization, lub uzupełnia metody klasyczne o ten mechanizm. Jak zaproponowane w rozprawie modyfikacje odnoszą się do elityzmu?

Drobne uwagi

W tekście pracy wielokrotnie wprowadzana jest definicja tych samych pojęć, skrótów lub symboli, niekiedy w ramach jednego rozdziału, np. SM, „end-to-end delay” (rozdział 3). Z drugiej strony brak formalnej definicji innych pojęć, np. klas systemu czasu rzeczywistego (rozdział 3). W obszerniejszych tekstach tego rodzaju nieścisłości można uniknąć wprowadzając globalną tabelę głównych skrótów i symboli, z wydzieleniem jej poza ramy pojedynczego rozdziału.

4. Ocena rozprawy

Przedmiot rozprawy odpowiada wyzwaniom naukowym i technicznym podnoszonym aktualnie w dyskusjach o wdrożeniu systemów Internetu Rzeczy oraz nowoczesnych sieci przemysłowych. Autor dobrze orientuje się w bieżącym stanie wiedzy i głównych trendach. Na uwagę zasługuje skrupulatne podejście do badania zjawisk zachodzących w układach sieciowych nie tylko w płaszczyźnie logicznej, ale również związanych z pracą fizycznych urządzeń. Już na początku rozprawy Autor dostrzegł potrzebę dokonania synchronizacji w rozproszonych systemach przemysłowych, gdzie zmiany warunków pracy, zwłaszcza temperatury, niejednokrotnie zachodzące w sposób gwałtowny i nieprzewidziany, mogą

istotnie wpływać na postrzeganie spektrum czasowo-przestrzennego przez komunikujące się ze sobą węzły.

Prowadzone w dalszej części pracy rozważania i projektowane algorytmy również mają wymiar praktyczny. Proponowane zmiany i usprawnienia odpowiadają ściśle potrzebom wdrożeniowym, gdzie warunki techniczne narzucają oszczędne gospodarowanie energią i mocą obliczeniową. Co szczególnie cenne, badania prowadzone były wielopłaszczyznowo, tj. zarówno w sferze teoretycznej, symulacyjno-numerycznej i eksperymentalnej, z wykorzystaniem rzeczywistych sieci i urządzeń. Świadczy to o stosunkowo rozległej wiedzy i szerokim wachlarzu kompetencji Autora.

Wywód prowadzony jest w sposób przemyślany i konsekwentny. Autor nie boi się wskazać niedoskonałości istniejących rozwiązań i własnych propozycji. Przy czym krytyka jest wyważona i ujęta w fachowe ramy. Natomiast kompozycja pracy i przyjęta strategia prezentacji, tj. posilkowanie się danymi spoza głównego tekstu rozprawy, budzi pewne zastrzeżenia. Bywa, że w obrębie jednego akapitu Autor odwołuje się do wzoru z artykułu naukowego (nieujętego w tekście pracy, ani w materiałach dodatkowych), ilustracji z załącznika i tabeli z materiałów zamieszczonych na płycie CD. Takie podejście rozprasza uwagę czytelnika i zaniża klarowność niektórych fragmentów pracy. Wnikliwa lektura nie zawsze pozwala rozwiązać wątpliwości, m. in. zasygnalizowane w sekcji Uwag niniejszej recenzji. Mimo to wnioski i spostrzeżenia przedstawiono w sposób przejrzysty i dokument nie wymaga redakcyjnej korekty.

Częściowe wyniki badań ujęto w kilku liczących się publikacjach, m. in. dwóch artykułów w pismach z tzw. listy filadelfijskiej *Wireless Personal Communications* (IF = 2,017), *Ad Hoc Networks* (IF = 4,111) oraz referatów prezentowanych na międzynarodowych konferencjach.

Podsumowując, rozprawa zawiera oryginalne, wartościowe wyniki, poszerzające wiedzę w domenę informatyki i telekomunikacji i należy ją ocenić zdecydowanie pozytywnie.

5. Wniosek końcowy

Uważam, że zakres przeprowadzonych badań i przedstawiona do oceny rozprawa mgr. inż. Adama Kozłowskiego oraz powiązany z nią dorobek publikacyjny spełniają wymagania stawiane rozprawom doktorskim i tym samym rekomenduję dopuszczenie jej do publicznej obrony.

P. Ignaciuk

dr hab. inż. Przemysław Ignaciuk

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 niejawną 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 harmonogramowania 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 umotywował 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 przebadiał 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 rozwiązywania zdefiniowanego problemu badawczego jest podjęcie przez Doktoranta dyskusji nad analizą możliwości wykorzystania algorytmów genetycznych do doboru konfiguracji sieci. Metodyka zastosowania algorytmów genetycznych do rozwiązywania 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 przesłany 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