

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 uśpiętego, 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. posiłkowanie 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 domenie 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