

mp. 7D ITT - 24.10.2023

Warszawa, 14.10.2023

dr hab. inż. Zbigniew Zieliński
Wydział Cybernetyki
Wojskowa Akademia Techniczna
zbigniew.zielinski@wat.edu.pl

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY DYSCYPLINY NAUKOWEJ INFORMATYKA
TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ**

Tytuł rozprawy: ANALIZA METOD IMPLEMENTACJI SIECI PROGRAMOWALNYCH
W KOMPUTEROWYCH SYSTEMACH PRZEMYSŁOWYCH WYKORZYSTUJĄCYCH
PRZEMYSŁOWY INTERNET RZECZY

Autor rozprawy: mgr inż. Ireneusz Smółka

1. Zagadnienie naukowe sformułowane w rozprawie, tezy, zakres i charakter rozprawy

Rozpatrując zagadnienie naukowe sformułowane w rozprawie należy zwrócić uwagę na permanentny rozwój i ciągłe poszukiwania (szczególnie w ostatnich latach) nowych rozwiązań w dziedzinie informatyki i telekomunikacji. Dokonujący się postęp technologiczny, wzrastające możliwości sieci i maszyn obliczeniowych kreują nowe potrzeby użytkowników i nowe zastosowania. Rozwój ten dotyczy także informatycznych systemów przemysłowych (ISP), których immanentną częścią są sieci przemysłowe. Głównym motorem rozwoju ISP jest przede wszystkim dążenie do poprawy efektywności działania systemów na wielu płaszczyznach, w szczególności bardziej ekonomiczna realizacja zadań produkcyjnych, wytwarzanie lepszych jakościowo i nowoczesnych produktów przy jednoczesnej poprawie bezpieczeństwa i wydajności produkcji. Rozwój ten jest związany również ze sposobem produkcji, elastycznością stosowanych rozwiązań i łatwością wprowadzania modyfikacji do istniejących systemów, a także zapewnieniem interoperacyjności różnych systemów itp. W rozwoju ISP podlegającym paradygmatowi koncepcji Przemysłu 4.0 obserwujemy

łączenie i konwergencję nowych koncepcji, metod i technologii, takich jak sztuczna inteligencja, systemy cybernetyczno-fizyczne CPS (ang. Cyber-Physical Systems), Internet rzeczy (w szczególności Przemysłowy Internet rzeczy), wirtualizacja i przetwarzanie w chmurze. Stąd też bardzo istotnym zagadnieniem w rozwoju sieci i komputerowych systemów przemysłowych staje się integracja systemów. Integracja systemów realizowana może być na różnych poziomach, tj. na poziomie warstwy obiektowej, warstwy sterowania, warstwy wizualizacji, a także na poziomie warstw wyższych systemu zarządzania przedsiębiorstwem. Bardzo istotnym problemem integracji i zapewnienia interoperacyjności na poziomie urządzeń i systemów przemysłowych są pojawiające się ograniczenia różnej natury, które wymagają całkowicie odmiennego podejścia do projektowania i budowy komputerowego systemu przemysłowego. Przemysłowe systemy komputerowe w większości są systemami czasu rzeczywistego, co oznacza że ich działanie musi polegać na terminowym wypracowywaniu sygnałów sterowania i decyzji w reakcji na zdarzenia zachodzące w ich otoczeniu. W konsekwencji, wszystkie urządzenia stosowane w warstwie sterowania muszą działać w trybie czasu rzeczywistego, tj. muszą cechować się determinizmem czasowym. Stąd bardzo istotne mogą być napotymane ograniczenia czasowe, wynikające z wprowadzenia dodatkowych elementów funkcjonalnych. Szereg bardzo trudnych ograniczeń występujących przy integracji sieci przemysłowych można wyeliminować przez zastosowanie technologii sieci programowalnych SDN, jednak ciągle otwartym pozostaje następujące pytanie: jak należy wdrażać sieci definiowane programowo w rozproszonych systemach przemysłowych i jaki będzie to miało wpływ na ich funkcjonowanie?

Rozprawa doktorska mgr. inż. Ireneusza Smółki jest poświęcona rozważaniom dotyczącym metod implementacji sieci definiowanych programowo w zdecentralizowanych systemach przemysłowych. Głównym celem pracy jest opracowanie metod implementacji sieci definiowanych programowo SDN w infrastrukturze sieci komputerowego systemu przemysłowego ze szczególnym uwzględnieniem możliwości integracji systemów i spełniania wymagań dotyczących determinizmu czasowego. Podjęte w rozprawie cele badawcze dobrze wpisują się w aktualne i ważne z praktycznego punktu widzenia problemy badawcze, dotyczące rozwoju i integracji przemysłowych systemów komputerowych.

Celami szczegółowymi w sferze poznawczej są:

- analiza wymagań stosowanych względem komputerowych systemów przemysłowych oraz określenie możliwości stosowania rozwiązań SDN w infrastrukturze sieci przemysłowych z wykorzystaniem typowych ogólnie dostępnych platform komputerowych (COTS),

- ocena poprawności pracy komputerowych systemów przemysłowych czasu rzeczywistego z wykorzystaniem sieci SDN,
- określenie architektury komputerowych systemów przemysłowych wykorzystujących sieci SDN.

W rozprawie sformułowano i zbadano następujące tezy:

Teza 1: *Możliwe jest zastosowanie urządzeń wbudowanych wspierających system operacyjny Linux i dostępnych na rynku jako kontrolerów sieci definiowanych programowo.*

Teza 2: *Możliwe jest wykorzystanie sieci definiowanych programowo w projektach przemysłowych w celu zarządzania urządzeniami przemysłowego Internetu rzeczy (ang. Industrial Internet of Things)*

Teza 3: *Możliwe jest wykorzystanie sieci definiowanych programowo w projektach przemysłowych jako integratora różnych systemów stosowanych obecnie i w przyszłości.*

Słuszność tezy została potwierdzona wynikami, przede wszystkim badaniami eksperymentalnymi, uzyskanymi przy wykorzystaniu modelu sieci przemysłowej z wykorzystaniem nowoczesnych symulatorów i urządzeń dostępnych na rynku.

Rozpatrywane w rozprawie zagadnienia mieszczą się w kilku obszarach badawczych dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja, takich jak projektowanie systemów i sieci komputerowych, systemy czasu rzeczywistego, systemy rozproszone.

Praca ma charakter analityczno-eksperymentalny. Część analityczna pracy obejmuje opracowanie modelu sieci pozwalającego m.in. na określanie kosztu transmisji pomiędzy wybranymi punktami sieci definiowanej programowo w przypadku, gdy przełącznik SDN jest nieskonfigurowany i wymagane jest odczytanie informacji z kontrolera oraz w przypadku, gdy przełącznik SDN jest skonfigurowany i połączenie może być zrealizowane natychmiastowo.

Badania eksperymentalne miały na celu sprawdzenie istotnych parametrów sieci dla poprawnego działania komputerowych systemów przemysłowych. Eksperymenty zostały przeprowadzone metodami symulacyjnymi z wykorzystaniem wirtualnych obrazów rzeczywistych urządzeń. Rozpatrywane w rozprawie zagadnienia są bezpośrednio powiązane z obiektem badań, którym są rozproszone komputerowe systemy przemysłowe. Autor odnosi się do istotnych rzeczywistych uwarunkowań i wymagań stawianych tego typu systemom. Stąd też wyniki rozprawy mają ściśle utylitarne znaczenie.

2. Syntetyczna analiza treści rozprawy

Zasadnicza część rozprawy składa się z 10 rozdziałów.

Rozdział 1. zawiera wprowadzenie w tematykę rozprawy, przedstawienie kontekstu rozważanego zagadnienia, genezę podjętego problemu badawczego i jego usytuowanie na tle aktualnego stanu badań.

W rozdziale 2. przedstawiono modele referencyjne stosowane do opisu systemów przemysłowych. Odwzorowane zostały obszary modeli referencyjnych, których dotyczą zaproponowane w rozprawie rozwiązania i określono możliwy ich wpływ na działania całego systemu. Przeanalizowano także specyfikę sieci przemysłowych, architekturę i własności węzłów rozproszonych komputerowych systemów przemysłowych czasu rzeczywistego ze szczególnym uwzględnieniem cyklu pracy węzła sterowania. Rozdział 2. Jest dość obszerny i zawiera fragmenty dotyczące zagadnień powszechnie znanych, jak np. topologie sieci. Nie widzę potrzeby zamieszczania w rozprawie doktorskiej opisów typowych topologii sieci (liniowej, magistralowej czy gwiazdy).

Rozdział 3. poświęcony został problematyce Przemysłowego Internetu rzeczy, który umożliwi połączenia dwóch domen: OT – domeny produkcyjnej przemysłowych systemów sterowania (ang. Industrial Control System) oraz IT tj. domeny zarządzania przedsiębiorstwem. Połączenie IT z OT zapewnia większą spójność systemów w zakresie automatyzacji i optymalizacji oraz lepszą dostępność danych odnoszących się do dostaw i logistyki. Należy stwierdzić, że problematyka Przemysłowego Internetu rzeczy została przedstawiona w tym rozdziale bardzo pobieżnie. Można by oczekiwać znacznie szerszego przedstawienia tej problematyki istotnej z punktu widzenia tematu rozprawy, jak chociażby określenie specyfiki Przemysłowego Internetu rzeczy.

Dwa kolejne rozdziały, tj. 4. i 5. obejmują problematykę sieci definiowanych programowo (SDN). W rozdziale 4. nakreślono podstawy działania sieci SDN, opisano wykorzystywane protokoły i narzędzia SDN, scharakteryzowano wirtualne przełączniki sieciowe Open vSwitch i Mikrotik oraz możliwości ich wykorzystania w sieciach SDN. Na podstawie analizy porównawczej wskazano kontroler, który pozwala na szybką rekonfigurację oraz znaczące możliwości rozbudowy sieci.

Kluczowe treści dla postawionych w rozprawie tez przedstawione zostały w rozdziałach 6 – 10.

W rozdziale szóstym zaprezentowana została koncepcja badań symulacyjnych. Opisano zakres przeprowadzonych w ramach rozprawy badań w środowiskach symulacyjnych Mininet oraz GNS3. Podejście zaproponowane przez Doktoranta pozwoliło

z jednej strony zbudować modele sieci przemysłowych powszechnie stosowanych w rzeczywistej infrastrukturze przemysłowej, jak również badać w pełnym zakresie funkcje przełączników sieciowych SDN w środowisku symulacyjnym. W rozdziale przedstawiono ogólny plan badań symulacyjnych obejmujący cztery podstawowe scenariusze.

Rozdział siódmy poświęcono opracowanemu w rozprawie modelowi sieci zawierającej kontroler SDN i przełączniki SDN. Efektem końcowym tego rozdziału jest określona funkcja kosztu transmisji, umożliwiająca oszacowanie czasu potrzebnego na rekonfigurację przełączników w sieci o zadanej strukturze.

W rozdziale ósmym opisano przeprowadzone w ramach rozprawy badania eksperymentalne. W celu sprawdzenia pracy urządzeń wbudowanych w warunkach czasu rzeczywistego zbudowano stanowisko laboratoryjne do analizy szybkości działania urządzeń wbudowanych z programem sterującym dla sterownika PLC. Warto podkreślić, że eksperymenty prowadzono z wykorzystaniem konfiguracji bardzo zbliżonych do stosowanych w rzeczywistych sieciach przemysłowych. W tej części opisany został także zrealizowany model sieci przemysłowej typu EtherCAT oparty na urządzeniu wbudowanym, pełniącym rolę zarządcy infrastruktury sieci. Opisano także badania polegające na zastosowaniu protokołów pozwalających na integrację różnych sieci, między innymi, z sieciami Przemysłowego Internetu rzeczy. W ramach tego rozdziału zaprezentowano zbudowany przez Doktoranta przełącznik sieciowy na bazie płyty komputerowej Raspberry Pi. Zrealizowano schemat sieci z wykorzystaniem przełącznika SDN pozwalającej na dublowanie ruchu sieciowego. Zrealizowano i przebadano sposób dynamicznej modyfikacji topologii sieciowej w przełączniku sieciowym SDN. Zaletą takiego rozwiązania jest łatwość przekierowania ruchu sieciowego do określonego urządzenia podłączonego bezpośrednio do przełącznika sieciowego. Eksperymenty związane z modyfikacjami topologii sieciowej zostały przeprowadzone w sieciach typu EtherCAT. W końcowej części rozdziału ósmego poddano analizie możliwości integracji systemów przemysłowych z rozwiązaniami chmurowymi i sposoby dystrybucji danych oraz analizy chmurowej. Przeprowadzono badania szeregu konfiguracji z użyciem sprzętu pozwalającego na zbieranie danych z systemów przemysłowych i przekazywanie ich do chmury obliczeniowej. W ostatnim akapicie rozdziału można znaleźć dość lakoniczną informację o rozwiązaniu pewnych problemów związanych z atakami sieciowymi przy użyciu elementów sieci SDN.

Rozdział 9. zawiera wyniki obszernych eksperymentalnych badań charakterystyk czasowych urządzeń stosowanych w sieciach przemysłowych różnych typów z wykorzystaniem sieci SDN. W szczególności przedstawiono, m. in., wyniki badania

wpływu obciążenia urządzeń wbudowanych (Raspberry Pi, Beagle Bone Black) działających jako sterownik PLC na ich pracę w reżimie czasu rzeczywistego. Zaprezentowano także wyniki pomiarów parametrów czasowych pracy sieci zarówno bez wykorzystania przełączników SDN, jak i z zainstalowanym przełącznikiem sieciowym SDN. W ramach wyników przedstawiono rozkład czasu odpowiedzi w sieci EtherCAT z urządzeniami SDN oraz opóźnienia wprowadzane przez kolejne urządzenie biorące udział w komunikacji wraz z ich rozkładami. Zaprezentowano wyniki badań parametrów czasowych w sieciach bezprzewodowych EtherCAT wykorzystujących sieci programowane SDN, zarówno do pracy w domyślnej konfiguracji, jak i po wprowadzeniu dodatkowych elementów, takich jak przełączniki SDN czy most bezprzewodowy. W końcowej części zaprezentowano wyniki badań dotyczących integracji sieci przemysłowej z systemem OPC UA.

W rozdziale 10. zamieszczone zostało krótkie podsumowanie rozważań przedstawionych w rozprawie oraz praktyczne wnioski wynikające z przeprowadzonych badań. Zabrakło jednak wskazania kierunków dalszych badań, dotyczących zastosowania urządzeń sieci SDN w sieciach przemysłowych, jak chociażby związanych z zapewnieniem bezpieczeństwa tych sieci.

3. Ocena poprawności i oryginalności postawionych tez i stopnia, w jakim zostały one wykazane

Opiniowaną pracę oceniam pozytywnie zarówno ze względu na jej aspekt praktyczny, wynikający z potrzeb projektowania i eksploatacji rozproszonych systemów przemysłowych, jak i oryginalny sposób potraktowania rozpatrywanej tematyki. Uważam, że cele pracy zostały osiągnięte, a postawione tezy wykazano za pomocą przeprowadzonych analiz i eksperymentów. Na szczególne wyróżnienie, upoważniające mnie do takiej oceny rozprawy, zasługują:

- 1) uzasadnienie podjęcia tematu, wynikające z przeprowadzonej analizy stanu wiedzy, jak również z własnych doświadczeń Doktoranta;
- 2) umiejętność korzystania ze współczesnej literatury specjalistycznej oraz formułowania oryginalnych wniosków, co dowodzi dojrzałości zawodowej Doktoranta;
- 3) przeprowadzenie obszernych badań symulacyjnych i eksperymentalnych na sieciach przemysłowych z wykorzystaniem rzeczywistych urządzeń stosowanych w przemyśle;
- 4) praktyczne znaczenie uzyskanych wyników, a w szczególności implementacja mechanizmów sieci SDN w sieci przemysłowej, pozwalająca na integrację różnych typów sieci przemysłowych i ich rozbudowę.

4. Analiza wykorzystanych źródeł

Autor w całej rozprawie odwołuje się do 66 pozycji literatury, związanych z tematyką pracy. Analizuje literaturę głównie w rozdziałach drugim i ósmym. Na jej podstawie podaje definicje podstawowych pojęć, które wykorzystał w badaniach prezentowanych w dysertacji oraz szczegółowo omawia problemy związane z technologiami wykorzystywanymi w sieciach przemysłowych.

Cytowana w rozprawie literatura stanowi w większości aktualne i znaczące dla problematyki rozprawy pozycje literatury światowej, które obejmują szereg istotnych obszarów wiedzy w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja, jak sieci komputerowe, a w szczególności przemysłowe sieci komputerowe, systemy rozproszone, systemy czasu rzeczywistego, sieci definiowane programowo, technologie Internetu rzeczy, narzędzia symulacji sieci i systemów teleinformatycznych. Biorąc pod uwagę fakt, że problematyka rozważana w rozprawie jest dość obszerna, liczbę cytowanych pozycji literatury w rozprawie należy uznać za skromną. W pracy (w szczególności w rozdziale 3.) brakuje szerszego odniesienia się do pozycji literatury, dotyczących bardzo dynamicznie rozwijających się technologii Internetu rzeczy. Podobnie, analizując możliwości wykorzystania sieci SDN w systemach czasu rzeczywistego (rozdział 5.) Autor nie powołuje się na znane rozwiązania opisane w literaturze, jak np. Goswami, B., Hu, S., Feng, Y. (2022). Software-Defined Networking for Real-Time Network Systems. In: Tian, Y.C., Levy, D.C. (eds) Handbook of Real-Time Computing. Springer.

Niezależnie od stwierdzonych niedostatków należy stwierdzić, że w rozprawie w dostatecznym stopniu odzwierciedlono aktualny stan wiedzy i techniki w zakresie problematyki wykorzystania sieci definiowanych programowo w komputerowych systemach przemysłowych.

5. Słabe strony rozprawy i jej główne wady

Za najslabszą stronę rozprawy uważam prezentację uzyskanych wyników. Główne zastrzeżenia dotyczą braku dbałości Doktoranta o precyzję sformułowań, spójność terminologii oraz styl pracy. W szczególności, przedstawiony w rozdziale 7. opis modelu badawczego budzi najwięcej zastrzeżeń w tym zakresie. Określane w rozdziale 7. rozprawy pojęcia są nieoprawnie bądź nieprecyzyjnie opisywane. Przykładowo, definiowane w formułach na stronach 70. i 71. rozprawy określenia, oznaczające wg Doktoranta (odpowiednio w formułach): (1) - liczbę przełączników sieciowych, (2) - liczbę klasycznych

przełączników, (3) - liczbę kontrolerów SDN w rzeczywistości przedstawiają zbiory numerów tych obiektów. Określona w formule (4) liczba połączeń przedstawia zbiór elementów I_j , których znaczenia Doktorant nie wyjaśnia. Moim zdaniem liczebność wymaganych połączeń między urządzeniami sieciowymi należałoby przedstawić w formie macierzy. W dalszej części rozprawy określona w formule (5) funkcja kosztu transmisji, przedstawiająca czas na rekonfigurację przełączników podana jest bez żadnego uzasadnienia. Wprowadzone w równaniach (7) i (8) na stronie 72. zależności na czas połączenia pomiędzy klasycznymi przełącznikami i czas połączenia pomiędzy przełącznikami SDN wykorzystują współczynniki, które nie zostały jednoznacznie określone w Tabeli 4, tj. brakuje w niej oznaczeń wprowadzonych w równaniach.

Doktorant nie ustrzegł się także wielu błędów językowych, w szczególności, bardzo często w rozprawie używa określenia „ilość” w odniesieniu do zbiorów rzeczowników policzalnych zamiast „liczba”, np. na str. 17 – „ilość hostów”, na str. 72, w Tabeli 4 – „ilość interfejsów”, „ilość kontrolerów” itp. Występuje także błędne użycie wyrażenia „oparte o” jak np. w zdaniu „Innym przykładem sieci typu Master-Slave może być infrastruktura oparta o rozwiązanie EtherCAT”, zamiast „... oparta na rozwiązaniu EtherCAT” (strona 27.).

Ogólnie należy stwierdzić, że brak przejrzystości używanego stylu i usterki redakcyjne oraz interpunkcyjne utrudniają analizę treści rozprawy. Inne uwagi natury formalnej są przedstawione poniżej.

1. W rozprawie występują określenia o charakterze żargonowym, na przykład, „przetwarzanie w locie” - str. 29 rozprawy, w zdaniu „ ... dzięki możliwości przetwarzania jej zawartości w locie odbierają tylko dane dla siebie użyteczne”, kolejny przykład to wyrażenie „urządzenia dedykowane do analizy ..” – str. 112., pierwszy akapit od góry itp.
2. W tekście rozprawy występują nieoprawne odwołania do rysunków. Błędy te dotyczą rysunków od 2.1 do 2.15 (w tekście występują odpowiednio odwołania Rysunek 3.1 do Rysunek 3.15), brakuje również zamieszczonych w tekście rozprawy odsyłaczy do niektórych rysunków, jak np. do rysunków od 4.1 do 4.3, występują błędne odniesienia do rysunków 4.5 – 4.7 (w tekście odpowiednio: Rysunek 5.5 do Rysunek 5.7).
3. Co więcej, w tekście rozprawy błędne odsyłacze występują również w przypadku prezentowanych na rysunkach wykresów ilustrujących wyniki badań, jak np. błędne odwołania do rysunków od 10.14 do 10.23, co istotnie utrudnia ich analizę.

W pracy zabrakło rekomendacji dotyczących wdrażania sieci definiowanych programowo w komputerowych systemach przemysłowych. Poza zakresem pracy pozostaje

problematyka bezpieczeństwa sieci, tj. wpływu wdrażanych sieci SDN na bezpieczeństwo komputerowych systemów przemysłowych.

6. Znaczenie uzyskanych wyników dla dyscypliny naukowej informatyka techniczna i telekomunikacja

Wyniki uzyskane w rozprawie mają istotne znaczenie praktyczne dla rozwoju komputerowych systemów i sieci przemysłowych. Do najbardziej znaczących wyników rozprawy zaliczam:

1. Eksperymentalną ocenę wpływu wdrażania w sieci przemysłowej kontrolerów SDN na jej pracę z wykorzystaniem rzeczywistych urządzeń. W rozprawie sprawdzono, czy zastosowanie urządzeń zastępujących warstwę sterowania w przełączniku sieciowym pozwoli na poprawną pracę sieci przemysłowej ze względu na wymagania dotyczące funkcjonowania całego komputerowego systemu przemysłowego w czasie rzeczywistym. Otrzymane wyniki badań działania urządzenia w czasie realizacji programu wykonującego funkcję sterownika PLC pozwoliły określić warunki brzegowe na czas cyklu pracy sterowników PLC dla zapewnienia poprawności działania sieci i ciągłości komunikacji.
2. Opracowanie sposobu dynamicznej zmiany logicznej topologii sieci przemysłowej z wykorzystaniem kontrolerów SDN. Polega on na definiowaniu i zmianie odpowiednich reguł transmisji dla każdego z portów przełącznika oraz określeniu warunków jakie musi spełniać system, aby zapewnić jego poprawną i stabilną pracę. W szczególności określono, na drodze badań eksperymentalnych, wpływ jaki będzie miało opóźnienie wprowadzone przez infrastrukturę SDN (kontroler, przełącznik) na działanie komputerowego systemu przemysłowego.
3. Implementację sposobu zwielokrotniania strumieni ruchu sieciowego w sieci SDN, wynikiem prac w tym zakresie była realizacja dublowania transmitowanego ruchu z wykorzystaniem różnych parametrów, m.in. specyfikacji typu danych i portów źródłowych. Wprowadzenie tego rozwiązania pozwala na dynamiczne przekierowanie ruchu do różnych urządzeń i tym samym daje możliwość poprawy niezawodności lub też wydajności pracy komputerowego systemu przemysłowego. Jest też niezwykle istotne przy rozbudowie funkcjonalnej komputerowych systemów przemysłowych. Warto podkreślić, że zastosowanie przełącznika SDN nie wymaga modyfikacji topologii sieci i może być używane również w starszych systemach, co ma istotne znaczenie w rozbudowie sieci przemysłowych.

4. Opracowanie rozwiązania pozwalającego na integrację sieci przewodowej Ethernet z siecią bezprzewodową EtherCAT poprzez zastosowanie sieci programowalnych SDN. Zaproponowane rozwiązanie eliminuje ograniczenia powstające przy łączeniu zwykłych przełączników Ethernet w ramach sieci EtherCAT, powodowane sposobem pracy sieci bezprzewodowej. Dzięki wprowadzeniu przełączników SDN można połączyć ze sobą dowolną liczbę abonentów EtherCAT, w których zostanie zaprogramowany sposób przekazywania poszczególnych datagramów EtherCAT za pomocą tak zwanych przepływów. Ocenione zostało również opóźnienie powodowane przez urządzenia typu punkt dostępowy lub klient punktu dostępowego, wprowadzane do infrastruktury sieciowej.

Uzyskane w rozprawie rezultaty potwierdzają, że wykorzystanie sieci SDN w komputerowych systemach przemysłowych jest możliwe i może znacząco wpłynąć na ich rozbudowę oraz dalszy rozwój. Można oczekiwać, że wraz z rozwojem sprzętu i oprogramowania możliwe będzie bardziej efektywne zarządzanie sieciami przemysłowymi.

7. Podsumowanie oceny rozprawy

Niezależnie od wskazanych w recenzji niedostatków i uchybień, stwierdzam, że opiniowana praca zawiera sformułowanie i rozwiązanie aktualnego problemu badawczego o charakterze użytecznym, a jej Autor wykazał się ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną w zakresie dyscypliny naukowej informatyka techniczna i telekomunikacja.

Konkluzja

Uważam, że opiniowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez przepisy ustawy o tytułach i stopniach naukowych. W związku z powyższym **wniosuję o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie mgra inż. Ireneusza Smółki do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.**

