

Prof. Leszek Trybus  
Katedra Informatyki i Automatyki  
Politechnika Rzeszowska

Rzeszów, 10.09.2023 r.

**Recenzja**  
**rozprawy doktorskiej mgr inż. Ireneusza Smolki**  
**pt. *Analiza metod implementacji sieci programowalnych w komputerowych systemach przemysłowych wykorzystujących Przemysłowy Internet Rzeczy***

Niniejsza recenzja została sporządzona na prośbę Pana prof. dr hab. inż. Andrzeja Polańskiego, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Śląskiej.

**1. Zakres, cel i tezy**

Konwencjonalne sieci komputerowe o topologii zdefiniowanej podczas uruchamiania mają ograniczone możliwości wprowadzania późniejszych zmian. Wymusza je jednak stale rosnąca liczba urządzeń sieciowych, choćby ze względu na stopniowo wprowadzany Internet Rzeczy. Możliwość rozwiązania problemu stwarzają sieci SDN (*Software Defined Networks*) o topologii definiowanej programowo, czyli sieci programowalne. W sieciach SDN warstwa transportowa jest oddzielona od warstwy zarządczej, w której topologię można zmieniać. Dotychczasowe zastosowania SDN dotyczą jednak tylko dużych centrów danych.

Ze względu na wymaganie ciągłości pracy sieci przemysłowych przeznaczonych do sterowania, technologia SDN nie dotarła jak dotąd do komputerowych systemów przemysłowych. Mogłaby jednak być przydatna do diagnostyki, analizy i doboru parametrów, szybszej likwidacji awarii lub modernizacji. W tej sytuacji cel pracy określony przez Autora jako opracowanie i przedstawienie metod działania w przypadku zastosowania programowalnych sieci SDN w infrastrukturze sieci systemu przemysłowego uważam za jak najbardziej właściwy, zarówno pod względem metodologicznym jak i technicznym. Związane z tym celem tezy pracy stwierdzają, że: 1) urządzenie wbudowane może być kontrolerem SDN, 2) sieć SDN może zarządzać urządzeniami Przemysłowego Internetu Rzeczy, 3) sieć taka może integrować różne systemy sterowania.

Sieciami przemysłowymi skonfigurowanymi w rozprawie jako SDN były EtherCAT, Profinet, PowerLink, Modbus TCP i bezprzewodowy MQTT. Integrację sieci zademonstrowano za pomocą OPC UA. Jako urządzenia wbudowane posłużyły Raspberry Pi i Beagle Bone Black.

**2. Przegląd treści**

Oprócz wstępu (rozd. 1) i podsumowania (10), zasadnicze rozdziały pracy można zgrupować następująco:

- (i) komputerowe systemy przemysłowe (2, 3) i sieci programowalne (4, 5),
- (ii) symulacja i model badawczy sieci SDN (6, 7),
- (iii) badania na sprzęcie przemysłowym i ich wyniki (8, 9).

W części pierwszej, po podkreśleniu znaczenia determinizmu czasowego, prezentowane są topologie fizyczne (magistrala, linia, pierścień itd.) i logiczne (żeton, rozgłaszanie), oraz protokoły przemysłowe stosowane w badaniach (EtherCAT, Profinet itd.). W odniesieniu do technologii SDN omawiany jest protokół OpenFlow do definiowania reguł przepływów sieciowych, język P4, wirtualny przełącznik Open vSwitch oraz trzy kontrolery *open-source*,

z których wybrano OpenDayLight. Podkreślono, że od SDN oczekuje się dynamicznego zarządzania urządzeniami, zmiany topologii sieci i zmiany parametrów połączeń.

Symulatory Mininet i GNS3 przedstawione w części (ii) są faktycznie podstawową drogą analizy zachowania sieci przemysłowych. Mininet posłużył do badania wirtualnego kontrolera SDN i działania reguł w przypadku topologii liniowej (PowerLink, EtherCAT) i gwiazdy (Profinet, Modbus TCP). Model działania sieci określa czas transmisji między dwoma punktami na podstawie liczby urządzeń określonego typu, liczby połączeń, przepustowości łącza itp., a także faktu, czy przełączniki sieciowe są skonfigurowane, czy nie. Konfiguracja wymaga bowiem przesłania reguł z kontrolera SDN.

Badania laboratoryjne z zestawami sprzętu firmowego opisane w części (iii) obejmują dublowanie ruchu sieciowego (*mirroring*), dynamiczną modyfikację topologii, zarządzanie infrastrukturą bezprzewodową oraz integrację różnych sieci za pomocą OPC UA. Do badań posłużyła najpierw sieć EtherCAT ze sterownikiem PLC i wyspą I/O, uzupełniona urządzeniami Raspberry Pi/Beagle Bone z Linuxem, działającymi jako kontroler SDN lub przełącznik sieciowy. Płytę NetFPGA i program Wireshark wykorzystano do pomiarów czasów transmisji. Łączność bezprzewodową MQTT zapewnił most IoT w trybie WDS. Integrację systemów z OPC UA zademonstrowano dla sieci Profinet.

Wyniki pomiarów pokazały zgodne z oczekiwaniami działania skonfigurowanych infrastruktur SDN, w których urządzenia wbudowane pełnią rolę zarządczą, aczkolwiek należy liczyć się z wydłużeniem cyklu sieci zależnym przede wszystkim od sprzętu. Kontroler SDN umożliwił dynamiczne wybieranie odpowiednich urządzeń w ramach modyfikacji topologii. W sieci bezprzewodowej pojawiał się znaczący *jitter*, a także nawet parokrotne wydłużenie czasu cyklu części ramek. Wydłużenie cyklu ze względu na serwer występowało również w OPC UA.

### 3. Ocena ogólna

Na zasadniczy rezultat pracy składa się opracowanie, uruchomienie i przebadanie programowalnych infrastruktur sieciowych SDN w komputerowych systemach przemysłowych zestawionych w laboratorium, gdzie funkcję sterującą pełni urządzenie wbudowane. Zaletą sieci programowalnych jest możliwość dynamicznej zmiany topologii przy jednoczesnym zapewnieniu parametrów komunikacji wymaganych przez proces przemysłowy. Aktualnie sieci SDN stosowane są tylko w dużych centrach danych.

Platformami sprzętowymi do opracowania kontrolera SDN były Raspberry Pi i Beagle Bone Black, ew. z dodatkowymi łączami komunikacyjnymi w przypadku przełącznika sieciowego. Do przygotowania oprogramowania zastosowano narzędzia Open Flow, P4, Open vSwitch oraz OpenDayLight. Topologie sieci badano najpierw za pomocą symulatorów Mininet i GNS3 symulując także sterowniki PLC za pomocą CodeSysa. Do tak zaawansowanego zestawu narzędzi wybranych do realizacji pracy wypada odnieść się z uznaniem.

Badania rzeczywistych systemów przeprowadzono na firmowych zestawach sprzętowych z komunikacją EtherCAT, Profinet, PowerLink, Modbus TCP, MQTT i OPC UA. Tak bogaty wykaz świadczy wymownie o wysiłku Autora. Uzupełniając skonfigurowaną strukturę o kontroler pokazano najpierw, że technologia SDN umożliwia dynamiczną rekonfigurację sieci. Kolejne badania zorientowane były na ocenę czasów, w tym jak wygląda cykl sieci i jakość komunikacji, a szczególnie *jitter*. Wyniki pokazały, że zastosowanie SDN powoduje pewne wydłużenie cyklu, ale nie powinno to mieć znaczenia dla diagnostyki, aktualizacji, czy zmian po modernizacji lub awarii.

Zróznicowane protokoły komunikacyjne, firmowe zestawy sprzętowe oraz przemysłane scenariusze badań pokazują, że cel rozprawy, czyli analiza metod implementacji sieci programowalnych w komputerowych systemach przemysłowych został osiągnięty. Wynika to

również z wykazania poprawności tej pracy, tzn. możliwości: 1) wykorzystania urządzenia wbudowanego jako kontrolera SDN, 2) zastosowania sieci programowalnych do zarządzania urządzeniami, 3) wykorzystania ich do integracji różnych systemów za pomocą OPC UA. Należy jednak pamiętać o dopasowaniu parametrów sieci do wymagań systemu przemysłowego.

Spis publikacji liczy 66 pozycji reprezentatywnych dla tematyki rozprawy, wśród których znajduje się 6 prac Autora (indywidualna i 5 współautorskich). O jego doświadczeniu świadczą też dwa projekty badawcze (pojazd zintegrowany z robotem, SDN w audio/video) oraz 5 prac dla przemysłu – Bombardier/Alstom (laboratorium), Proloc (komunikacja sieciowa). Angażował się także w popularyzację nauki w szkołach średnich.

W sumie rozprawa doktorska mgr inż. Ireneusza Smołki zasługuje na dobrą ocenę. Postępując rzetelną, przemyślaną drogą osiągnął on postawiony cel jakim była analiza metod implementacji sieci programowalnych w zróżnicowanych komputerowych systemach przemysłowych.

#### 4. Uwagi

Poniższe uwagi dotyczące pewnych uzupełnień porządkujących treść oraz korekt edytorskich mają znaczenie drugorzędne i nie umniejszają wartości rozprawy.

- 1) Przykłady zmiany topologii sieci SDN prezentowane są w rozdz. 6, 7 w kilku miejscach. W szczególności na s. 61 pokazano jak blokować komunikację w topologii gwiazdy (Profinet, Modbus TCP) i podobnie na s. 87 (EtherCAT). Ze względu na pierwszoplanowe znaczenie zmian topologii w SDN dobrze byłoby zebrać te przykłady pod koniec pracy np. w formie wykazu.
- 2) Praktyczne zastosowanie technologii SDN może dotyczyć diagnostyki, parametryzacji, redundancji itd. Pod tym względem praca zyskałaby, gdyby *explicite* wskazać jak należałoby uzupełnić typowe sieci EtherCAT, Profinet, czy Modbus TCP dla zapewnienia takich funkcjonalności.

Pod względem formalnym praca wygląda dobrze, choć przy pewnych zastrzeżeniach. O ile język opisów tekstowych jest bez zarzutu, a rysunki wręcz znakomite, o tyle korekta treści mogłaby być staranniejsza. W szczególności:

- niezgodność numeracji rysunków z rozdziałami (już na s.8),
- niepoprawne zdania: s. 24, 36, 63, 68, 80, 90,
- s. 41, rysunku a nie tabeli,
- brak p. 6.1
- s. 89, o jaką publikację chodzi?
- numery literatury i rysunków podawane po kropce kończącej zdanie, którego dotyczą,
- kilkanaście literówek, s. 12, 27 itd.

#### 5. Wniosek końcowy

Uważam, że cel postawiony w rozprawie został osiągnięty. Autor dokonał analizy metod implementacji sieci programowalnych w komputerowych systemach przemysłowych z popularnymi protokołami komunikacyjnymi, zarówno poprzez symulacje jak i na zestawach z firmowym sprzętem. Badane sieci były uzupełniane opracowanym kontrolerem SDN i przełącznikiem sieciowym zrealizowanymi jako urządzenia wbudowane.

Uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Ireneusza Smołki pt. *Analiza metod implementacji sieci programowalnych w komputerowych systemach przemysłowych wykorzystujących Przemysłowy Internet Rzeczy* w pełni spełnia wymagania stawiane w Ustawie Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z dn. 3.07.2018 r. i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.