prof. dr hab. inż. Andrzej R. Pach
Instytut Telekomunikacji
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Kraków, dnia 15 kwietnia 2024 r.

Recenzja osiągnięcia naukowego dra inż. Jacka Stój

w związku z postępowaniem o nadanie stopnia doktora habilitowanego
w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych
w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja

1. Podstawy prawne sporządzenia recenzji

Niniejsza recenzja została wykonana w odpowiedzi na pismo z dnia 17.02.2024 Przewodniczącego Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Śląskiej prof. dr hab. inż. Andrzeja Polańskiego w związku z Uchwałą nr 139/2023 z dnia 19.12.2023 Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Śląskiej w sprawie powołania komisji habilitacyjnej w postępowaniu o nadanie stopnia doktora habilitowanego. Wraz z w/w pismem Recenzent otrzymał dokumentację wniosku na nośniku magnetycznym oraz umowę o dzieło nr UMC/0247/2024 na wykonanie recenzji. W umowie sprecyzowano szereg zasad zgodnie z którymi powinna być wykonana recenzja.

Recenzję przygotowano z uwzględnieniem zaleceń opublikowanych przez Radę Doskonałości Naukowej zamieszczonych na jej stronie internetowej w zakładce: https://www.rdn.gov.pl/dobre-praktyki.html

Oceny dokonano w oparciu o kryteria określone w art. 219 ust. 1 ustawy o szkolnictwie wyższym i nauce.

2. Podstawowe dane o Kandydacie

Dr inż. Jacek Stój ukończył studia magisterskie na Politechnice Śląskiej na kierunku informatyka o specjalności „Komputerowe systemy sterowania" w roku 2005.

W roku 2009, również na Politechnice Śląskiej, uchwałą Rady Wydziału Automatyki, Elektroniki i Informatyki uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie informatyka. Tytuł rozprawy *Wpływ redundancji na zależności czasowe w rozproszonych informatycznych systemach czasu rzeczywistego*. Do wniosku dołączono kopię odpisu dyplomu doktorskiego, co potwierdza spełnienie pkt 1 art. 219 ust. 1 ustawy „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce".

Kandydat w latach 2010 – 2014 był zatrudniony na stanowisku asystenta na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej, a od roku 2014 jest zatrudniony na stanowisku adiunkta.

Z przedłożonej dokumentacji nie wynika, aby dr inż. Jacek Stój ubiegał się wcześniej o nadanie stopnia doktora habilitowanego.

3. Osiągnięcie naukowe

Jako osiągnięcie naukowe, zgodnie z art. 219 ust. 1 pkt 2 lit. a, dr inż. Jacek Stój przedstawił monografię zatytułowaną *Wybrane zagadnienia sieci komunikacyjnych w przemysłowych systemach komputerowych*, której jest jedynym autorem, wydaną przez Wydawnictwa Politechniki Śląskiej w roku 2023, ISBN 978-83-7880-910-4. Wydawnictwo to jest uwzględnione w wykazie wydawnictw publikujących recenzowane monografie naukowe, identyfikator wydawnictwa UIW 48600. Opiniodawcami wydawniczymi monografii byli: prof. dr hab. inż. Leszek Trybus oraz dr hab. inż. Zbigniew Zieliński.

4. Ocena osiągnięcia naukowego

Tematyka monografii przedstawionej do oceny jest związana, jak wskazuje tytuł, z sieciami komunikacyjnymi dla zastosowań przemysłowych (ang. *industrial data networks, industrial networking*). Sieci przemysłowe maja bardzo długą historię (za pierwszy standard dla sieci przemysłowych można uznać RS-232 z roku 1960) i powstały przed sieciami komputerowymi opartymi na architekturze TCP/IP, a zwłaszcza wykorzystujących standard Ethernet. Wraz z dominacją architektury TCP/IP (dzięki gwałtownemu rozwojowi Internetu) w przesyłaniu danych rzeczą naturalna stało się przeniesienie tej architektury do sieci przemysłowych oraz jej koegzystencja z wcześniejszymi rozwiązaniami, które są nadal stosowane.

Sieci przemysłowe oparte są w zasadzie na dwóch typach transmisji: 1) transmisji szeregowej (najbardziej popularne protokoły to Profibus, Modbus RTU, CC-link, DeviceNet i CANopen) oraz 2) bazujące na standardzie Ethernet (EtherNet/IP, Profinet, EtherCAT i Modbus TCP). Może się zdarzyć, że w sieciach przemysłowych mogą egzystować oba typy transmisji. Kandydat w swoim osiągnięciu skupił się przede wszystkim na transmisji opartej o Ethernet. Jakkolwiek oba systemy transmisji występują w obecnych systemach równie często, to wybór Kandydata protokołów opartych na Ethernecie ma swoje uzasadnienie w kontekście dynamicznego rozwoju Internetu Rzeczy IoT (ang. *Internet of Things*) i Przemysłu 4.0. Należy zatem uznać, że tematyka podjęta w monografii jest aktualna.

Monografia składa się z dwóch zasadniczych części. W pierwszej (rozdziały 1-8) przedstawiono opis sieci przemysłowych pod kątem ich architektury, stosowanych urządzeń, parametrów charakteryzujących ich działanie, protokołów wymiany informacji oraz zagadnień związanych z integracją różnych systemów w celu zapewnienia komunikacji między nimi. W części tej przeanalizowano także aspekty bezpieczeństwa sieci oraz ich niezawodności i diagnostyki.

W drugiej części monografii (rozdział 9) opisano eksperymenty w trakcie których Kandydat zbadał różne właściwości sieci przemysłowych (np. czasy odpowiedzi systemu, opóźnienia wnoszone przez zastosowane w systemie urządzenia, możliwości tworzenia VLAN).

Monografia w sposób kompleksowy prezentuje zagadnienia związane z komunikacją w systemach przemysłowych w oparciu o klasyczny, często spotykany w literaturze model hierarchiczny przemysłowych systemów informatycznych, w którym Kandydat wyróżnił cztery warstwy (sterowania,, nadzoru, wytwarzania i zarządzania) leżące nad warstwą obiektów

przemysłowych. Poruszając się od warstwy najniższej do najwyższej zwiększa się wolumen przesyłanych danych, a także czas odpowiedzi systemu, odległości na jakie mają być przesłane dane oraz liczba adresatów informacji. Te istotne aspekty zostały uwzględnione w monografii. Należy podkreślić, że stopień zhierarchizowania sieci przemysłowych jest wyższy niż w klasycznych sieciach komputerowych.

Sieci przemysłowe charakteryzują się większą podatnością na uszkodzenia i stąd powinny być dobrze zaprojektowane pod kątem ich niezawodnej pracy, czasem odpowiedzi systemu (ang. *round trip delay*) rzędu 250 µs – 10 ms, determinizmem czasowym w dostarczaniu danych oraz spójnością czasową tego procesu. Kandydat w sposób w pełni zadawalający odniósł się do tych zagadnień.

W monografii przedstawiono typowe protokoły komunikacyjne dla sieci przemysłowych, a w tym bardziej szczegółowo protokół Modbus (jeden z pierwszych protokołów z r. 1979 dla sterowników PLC) wykorzystujący mechanizm „master-slave".

Kandydat dużo uwagi poświęcił wykorzystaniu bardzo szeroko rozpowszechnionego standardu Ethernet (IEEE 802.3) w sieciach przemysłowych. Standard ten jest powszechnie stosowany w sieciach komputerowych instalowanych w różnych instytucjach, które nie mają wymagań takich jak stawiane sieciom przemysłowym, a w szczególności dostarczania danych w czasie rzeczywistym. Jednakże powszechne stosowanie przełączników, które zapewniają full-duplexowe połączenia punkt-punkt, pozwala na zachowanie reżimu pracy w czasie rzeczywistym.

Dla klasycznych protokołów transmisji szeregowej utworzono ich ethernetowe wersje. I tak np. dla protokołu Modbus RTU utworzono Modbus TCP, dla DeviceNet – EtherNet/IP, dla CANopen – EtherCAT COE, dla Profibus – Profinet i dla CC-Link – CC-link IE. Z tej grupy protokołów Kandydat wybrał pięć, które poddał głębszej analizie: EtherNet/IP, Modbus TCP, Ethernet POWERLINK, Profinet oraz EtherCAT. Analiza dotyczyła działania tych protokołów (przy np. wykorzystaniu narzędzia Wireshark), długości cyklu wymiany danych, jittera, synchronizacji pracy węzłów sieci.

Kandydat także analizuje klasyczne techniki stosowane w sieciach Ethernet: tworzenie sieci wirtualnych (VLAN) i zapewnienie QoS za pomocą mechanizmu DiffServ.

Ważą częścią monografii jest rozdział 3 poświęcony komunikacji bezprzewodowej w zastosowaniu do sieci przemysłowych. Ogólne znane są zalety tego typu komunikacji, ale w przypadku środowiska przemysłowego ma ona kilka istotnych wad np. zakłócenia elektromagnetyczne, zaniki sygnału, interferencje wpływające na niepewność dostarczenia danych w określonym czasie czy łatwa możliwość cyberataku. Mimo tych wad wydaje się atrakcyjne stosowanie interfejsów radiowych w przypadku sieci np. sieci sensorów lub gdy transmitowane są krótkie ramki z danymi nie wymagające reżimu czasowego. Można także rozważać stosowanie w systemach przemysłowych coraz bardziej popularnych prywatnych sieci 5G.

W monografii przedstawiono najbardziej popularne sieci bezprzewodowe: WiFi (IEEE 802.11), Bluetooth i IEEE 802.15.4, wskazując zakres ich stosowalności w sieciach przemysłowych. Przedstawiono też rozwiązania bezprzewodowe bezpośrednio dedykowane sieciom przemysłowym: np. WIA-FA, FlexWare, iWLAN, WirelessHART.

Bardzo intersującą częścią monografii jest opis badań eksperymentalnych mających na celu zbadanie możliwości zastosowania sieci WiFi w sieci Profinet i EtherCAT.

Istotnym problemem przy rozbudowie lub modernizacji sieci przemysłowych jest ich integracja z nowymi komponentami w taki sposób, aby zapewnić komunikację między urządzeniami spełniającą wymagania stawiane takim sieciom. Integracja może również być rozumiana w sposób pionowy w modelu warstwowym dla sieci przemysłowych. Kandydat analizuje w swojej monografii w szczególności integrację na poziomie warstwy sterowania i jej interakcją z system przesyłania danych. W monografii opisano zagadnienia związane z integracją systemów scentralizowanych i rozproszonych pod kątem wymagań stawianych systemom czasu rzeczywistego. Rozważano m. in. problem integracji z separacją usług oraz stosowanie konwerterów protokołów.

Projektując systemy automatyki przemysłowej należy szczególną uwagę poświecić bezpieczeństwu ich działania. Temu zagadnieniu Kandydat poświęcił rozdział 6 swojej monografii rozważając aspekty bezpieczeństwa funkcjonalnego (związanego bezpośrednio z zainstalowanymi urządzeniami) oraz bezpieczeństwa zasobów (związanego z zagrożeniami zewnętrznymi czyli cyberbezpieczeństwa). Należy zaznaczyć, że ze względu na fakt, że sieci przemysłowe były do niedawna systemami wydzielonymi, problem cyberbezpieczeństwa nie był rozważany przy ich projektowaniu i instalacji. Sytuacja ta zmienia się jednak ostatnio ze względu na coraz szersze powiązanie systemów przemysłowych z systemami informatycznymi. Zauważa to Kandydat i analizuje w swojej monografii klasyczne zasady cyberbezpieczeństwa dla systemów informatycznych w kontekście sieci przemysłowych.

Jednym z bardzo istotnych wymagań stawianych sieciom przemysłowym jest ich wysoka niezawodność. Kandydat analizuje głównie podwyższenie stopnia niezawodności poprzez wprowadzenie redundancji sprzętowej, chociaż wspomina także o innych rozwiązaniach, których stosowalność w sieciach przemysłowych wydaje się być ograniczona. Kandydat opisuje np. zwielokrotnianie modułów wejściowych (magistral komunikacyjnych) lub liczby sensorów. Także opisuje redundancję w nieco bardziej złożonym podsystemie wyjść.

W monografii przedstawiono także rozwiązania poprzez wprowadzenie redundancji w systemie komunikacyjnym na przykładzie sieci Profinet i EtherCAT. Redundancja może też dotyczyć sterowników PLC (jednostek komputerowych). Opisano autorską koncepcję systemu wykorzystującego redundancję sterowników PLC typu „hot-standby" i skoncentrowano się m.in. na problemie zależności czasowych oraz zwiększaniu się czasu odpowiedzi systemu. Odpowiednie stosowanie redundancji ma wpływ na polepszenie parametrów MTBF oraz MTTR.

Koncepcja redundancji sterowników została sprawdzona eksperymentalnie, co zostało opisane w rozdziale 9 monografii. Badano trzy scenariusze awarii badając zachowanie się systemu w kontekście czasu odpowiedzi systemu w okresie przełączania się pomiędzy redundantnymi komponentami.

W sieciach przemysłowych istotną rolę gra ich diagnostyka, gdyż wczesne wykrycie nieprawidłowości w działaniu systemu oraz wskazanie ich źródła ma oczywisty na poprawę niezawodności systemu. Diagnostyka jest szeroko stosowna w przypadku systemów i sieci komputerowych i procedury stosowane do jej przeprowadzania są opisane w literaturze. Ze względu na specyfikę sieci przemysłowych, a przede wszystkim na różnorodność urządzeń w nich występujących procedury diagnozowania mają inny charakter. Kandydat opisuje w jaki sposób można diagnozować sieci przemysłowe oraz jakie analizatory sieci można zastosować np. dla sieci Profibus (Profibus Diagnostic Suite). W przypadku sieci pracujących w oparciu o standard Ethernet diagnostyka jest łatwiejsza ze względu szeroko rozpowszechnione testery

oraz narzędzia programistyczne (np. Wireshark, iperf), analizatory protokołów i in. Kandydat opisuje je częściowo w swojej monografii pod kątem ich stosowania w sieciach przemysłowych.

Ważną częścią monografii jest rozdział 9 poświęcony eksperymentom badawczym przeprowadzonymi przez Kandydata. O niektórych z nich wspomniano wcześniej. Eksperymenty te dotyczą zagadnień analizowanych w monografii i obejmują m.in. czasy odpowiedzi systemów rozproszonych, wartości jitteru, opóźnień wprowadzanych przez interfejs WiFi, tworzenia podsieci VLAN w sieci EtherCAT.

Podjęcie tematu sieci przemysłowych jest istotne z punktu widzenia ich szerokiego rozpowszechnienia a także prognozowanego rozwoju Przemysłu 4.0 i Internetu Rzeczy (IoT). W literaturze światowej jest spora liczba monografii dotyczących sieci przemysłowych, ale monografia Kandydata wyróżnia się bardzo szerokim spojrzeniem na tego typu sieci. W języku polskim jest to, zgodnie z wiedzą Recenzenta, pierwszą taką pozycją w tym obszarze.

W zakresie sieci przemysłowych istnieje bardzo dużo różnych rozwiązań. Część z nich posiada ogólnie dostępne standardy, inne są zgodne ze standardami firmowymi, a pozostałe rozwiązaniami jednostkowymi tworzonymi na potrzeby konkretnego np. systemu automatyki przemysłowej. W związku z tym trudno jest ująć lub scharakteryzować wszystkie możliwe sieci. Trudno też zawrzeć w jednej monografii wskazówki jaką sieć wybrać dla konkretnego systemu. Toteż Kandydat w swoim osiągnięciu koncentruje się na najbardziej popularnych sieciach w tym EtherCAT i Profinet. Nie mniej w monografii można znaleźć szereg wskazówek na co należy zwrócić uwagę projektując sieć, zwłaszcza w kontekście integracji systemów.

Należy podkreślić, że w monografii zawarte są także oryginalne pomysły Kandydata, weryfikowane za pomocą opisanych eksperymentów praktycznych (np. możliwość stosowania sieci SDN i tworzenie VLAN w sieciach EtherCAT), co spełnia kryterium odnośnie oryginalnego wkładu w rozwój dyscypliny „informatyka techniczna i telekomunikacja".

Przedstawiona monografia jest bardzo obszerna (367 stron) i zawiera obszerną bibliografię (316 pozycji). Napisana w sposób przejrzysty i oprócz walorów naukowych jest cennym źródłem informacji dla projektantów sieci przemysłowych.

5. Pozostały dorobek naukowy, dane naukometryczne i działalność badawcza

Prócz monografii podanej jako osiągnięcie naukowe dra Jacka Stója w dokumentacji do wniosku wskazano na 41 innych publikacji z czego 30 opublikowano po uzyskaniu stopnia doktora. Wśród tych ostatnich 17 publikacji to artykuły opublikowane w materiałach konferencyjnych i 9 w czasopismach. Należy zwrócić uwagę na fakt, że wśród publikacji w czasopismach pięć jest wysoko punktowanych (min. 100 pkt.) a cztery z nich zostały opublikowane w latach 2021-2023. Można stwierdzić, że Kandydat rozpoczął publikowanie w renomowanych czasopismach oraz w materiałach bardziej prestiżowych konferencji (WiMob 2021, ICCCI 2021, 2022 i IEEE Int. Conf. on Big Data, 2022) dopiero w ostatnim czasie. Nie dziwi zatem fakt, że indeksy Hirscha są stosunkowo niewielkie i w zależności od źródła mieszczą się w przedziale 4 - 6. W zdecydowanej większości publikacji Kandydat jest współautorem i jego udział w publikacjach waha się w przedziale 10-90%.

Tematyka publikacji Kandydata jest w zdecydowanej większości związana z sieciami przemysłowymi i systemami czasu rzeczywistego. W opinii Recenzenta zawarte w tych

publikacjach wyniki w znaczący sposób wpłynęły na kształt osiągnięcia naukowego w postaci monografii.

Na uwagę zasługują następujące publikacje z dominującym udziałem Kandydata:

- **J. Stój (100%)**, *Cost-effective hot-standby redundancy with synchronization using EtherCAT and real-time Ethernet protocols*, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2021.
- **J. Stój (70%),** A. Ziębiński (20%), R. Cupek (10%), *FPGA based industrial Ethernet network analyser for real-time systems providing openness for industry 4.0*, Enterprise Information Systems, 2022.
- Smołka (40%), **J. Stój (60%)**: *Utilization of SDN Technology for Flexible EtherCAT Networks Applications*, Sensors, 2022.
- **J. Stój (50%)**, A.-L. Kampen (20%), R. Cupek (10%), I. Smołka (15%), M. Drewniak (5%): *Industrial shared wireless communication systems – use case of autonomous guided vehicles with collaborative robot*, Sensors, 2023.

Wyżej wymienione publikacje są związane z tematyką przedstawioną w monografii.

Zaprezentowany dorobek naukowy dotyczy głównie następujących obszarów:

- zastosowanie redundancji w sieciach przemysłowych i jej wpływ na zależności czasowe (doświadczanie Kandydata w tym obszarze pozwoliło na uruchomienie systemu czasu rzeczywistego w zakładzie przemysłowym);
- zastosowanie wirtualizacji w sieciach przemysłowych i badanie wirtualizacji w kontekście sieci SDN (wirtualizacja funkcji sieciowych);
- zastosowanie sieci przemysłowych w Przemyśle 4.0;
- bezprzewodowa transmisja danych dla pojazdów typu AVG.

Po uzyskaniu stopnia doktora Kandydat uczestniczył w dwóch znaczących projektach badawczych:

- Projekt LIDER (2014) realizowany w Wydziale Chemicznym PŚl dotyczącym wytwarzania bezchromianowych powłok konwersyjnych. Udział Kandydata w tym projekcie polegał na stworzeniu zautomatyzowanej linii technologicznej.
- CoBotAGV (od roku 2021, NCBiR, grant norweski) dotyczącym rozwiązań dla logistyki wewnętrznej. Kandydat bierze udział w pracach dotyczących integracji systemu w oparciu o komunikację M2M i M2S.

Kandydat współpracował naukowo z Uniwersytetem Bielsko-Bialskim, Politechniką Rzeszowską oraz obecnie współpracuje z Western Norway University of Applied Sciences. W wyniku tej współpracy powstało 11 artykułów naukowych.

Należy także podkreślić, że Kandydat był zaangażowany w projektowanie i uruchamianie systemów przemysłowych uzdatniania wody wykorzystując swoją wiedzę z zakresu sieci przemysłowych.

Kandydat był zapraszany do recenzowania prac naukowych zgłaszanych na konferencje międzynarodowe a także do czasopism w tym do prestiżowych IEEE Access i IEEE Transactions on Industrial Informatics. W sumie kandydat wykonał 46 recenzji.

Za działalność naukową Kandydat został dwukrotnie wyróżniony Nagrodą Rektora Politechniki Śląskiej.

6. Działalność dydaktyczna, organizacyjna i popularyzująca naukę

Działalność dydaktyczna Kandydata jest związana z przedmiotami z zakresu informatyki przemysłowej. Prowadził m. in. zajęcia z programowania sterowników przemysłowych, przemysłowych systemów czasu rzeczywistego, sieci przemysłowych, projektowania przemysłowych systemów komputerowych oraz systemów mobilnych i przemysłowych. Do realizacji tych zajęć Kandydat przygotował szereg stanowisk laboratoryjnych.

Kandydat był członkiem komitetu organizacyjnego cyklicznej międzynarodowej konferencji Computer Networks oraz redaktorem naukowym materiałów konferencyjnych wydawanych przez Wydawnictwo Politechniki Śląskiej w zeszytach naukowych Studia Informatica.

Za działalność organizacyjną Kandydat został czterokrotnie wyróżniony Nagrodą Rektora Politechniki Śląskiej.

7. Wniosek końcowy

Osiągnięcie naukowe w postaci monografii dra inż. Jacka Stója jest spójnym spojrzeniem na istotne aspekty sieci przemysłowych i stanowi znaczący wkład w rozwój dyscypliny Informatyka techniczna i telekomunikacja.

Kandydat wykazuje się istotną działalnością naukową.

Przedstawiony wniosek o przeprowadzenie postępowania o nadanie stopnia spełnia wszystkie przesłanki i wymagania określone w obowiązującej Ustawie.

Wnoszę zatem o dopuszczenie dra inż. Jacka Stója do dalszych etapów postępowania i popieram wniosek nadanie stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.