

**Recenzja rozprawy doktorskiej dla Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika,  
Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej**

**Tytuł rozprawy: Opracowanie inteligentnych bezprzewodowych czujników i układów pomiarowych  
dedykowanych Internetowi Rzeczy w laboratoriach testów komponentów lotniczych**

**Autor rozprawy: mgr inż. Tomasz Kabala**

**Promotor: dr hab. inż. Jerzy Weremczuk**

**1. Podstawa prawna recenzji**

Niniejszą recenzję przygotowałem na podstawie Uchwały nr 806/II/2024 Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej z dnia 17 września 2024 r. w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy mgr. inż. Tomaszowi Kabale.

**2. Jakie zagadnienie naukowe rozpatrzono w pracy i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora?**

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgra inż. Tomasza Kabali „*Opracowanie inteligentnych bezprzewodowych czujników i układów pomiarowych dedykowanych Internetowi Rzeczy w laboratoriach testów komponentów lotniczych*” wpisuje się w niełatwą formułę doktoratu wdrożeniowego, w którym badania naukowe są łączone z praktycznymi potrzebami otoczenia społeczno-gospodarczego. Ta rozprawa dotyczy badań związanych z możliwością wdrożenia inteligentnych rozwiązań przeznaczonych dla Internetu Rzeczy w laboratoriach testujących komponenty lotnicze oraz proponowania innowacyjnych rozwiązań, pozwalających połączyć potencjał innowacyjnych przetworników i układów pomiarowych, opracowanych w ramach realizowanej rozprawy, z istniejącą infrastrukturą stanowisk badawczych. Doktorant na str. 15 postawił następującą tezę:

*Możliwe jest usprawnienie procesu przygotowania badań komponentów lotniczych i uzyskanie nowych możliwości badawczych przez wprowadzenie w laboratoriach bezprzewodowych inteligentnych przetworników i układów pomiarowych projektowanych z uwzględnieniem wymagań technicznych i specyfiki badań lotniczych. Nowe podejście do projektowania tych przetworników, ukierunkowane na wydłużenie czasu pracy przy zasilaniu bateryjnym, zwiększenie możliwości zasilania bezprzewodowego oraz opracowanie dedykowanych metod sterowania ustawnikami pozycyjnymi i metod detekcji wycieków pozwala zbudować konfigurowalny system Internetu Rzeczy o parametrach niedostępnych w obecnie stosowanych rozwiązaniach.*

Aby dowieść powyższej tezy Autor przeanalizował aktualny stan wiedzy na temat inteligentnych przetworników i układów pomiarowych oraz nowych rozwiązań w lotniczych laboratoriach badawczych. Na podstawie tej analizy zaproponował koncepcję rozwoju laboratoriów funkcjonujących w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytucie Lotnictwa i zrealizował ją wprowadzając w nim pracujące w strukturze sieci:

*edm*

- a) inteligentne przetworniki bezprzewodowe o małym zużyciu energii, które mogą współpracować ze standardowymi czujnikami wykorzystywanymi dotychczas w laboratoriach lotniczych;
- b) inteligentne bezprzewodowe wysokoobrotowe przetworniki pomiarowe;
- c) inteligentne bezprzewodowe ustawniki pozycyjne o małym zużyciu energii współpracujące z zaworami regulacyjnymi;
- d) inteligentne układy bezprzewodowe do wykrywania wycieków.

Kolejne etapy badań i prac projektowych zostały opisane w pięciu rozdziałach przy czym rozdziały 1, 2 i 3 to rozdziały wprowadzeniowo-przeładowe, będące podbudową do rozdziału czwartego, czyli właściwego rozdziału projektowo-konstrukcyjno-badawczego, opisującego rozwiązania inteligentnych przetworników i układów pomiarowych opracowane przez Doktoranta. Natomiast rozdział piąty zawiera podsumowanie efektów badawczych.

W rozdziale pierwszym, po wprowadzeniu w tematykę testów realizowanych w laboratoriach lotniczych, Autor przedstawił cel, tezę i zakres rozprawy. W rozdziale drugim Doktorant omówił obszary wytypowane do wdrożenia inteligentnych rozwiązań Internetu Rzeczy z punktu widzenia laboratoriów testujących komponenty lotnicze oraz scharakteryzował systemy aktualnie dostępne na rynku. W rozdziale trzecim znajduje się przegląd inteligentnych przetworników i układów pomiarowych spełniających wymagania laboratoriów lotniczych z punktu widzenia ich podstawowych charakterystyk, metod zasilania i metod komunikacji.

Własne prace projektowo-konstrukcyjno-badawcze Doktoranta, związane z budową czterech wspomnianych powyżej inteligentnych przetworników i układów pomiarowych przeznaczonych do pracy w laboratoriach Instytutu Lotnictwa oraz przykładowy sposób integracji zaproponowanych rozwiązań z nadrzędnym systemem kontrolno-pomiarowym zostały opisane w rozdziale czwartym. Natomiast w rozdziale piątym Doktorant podsumował zrealizowane prace i zaproponował dalsze potencjalne badania i prace wdrożeniowe dotyczące tematyki pokrewnej z poruszaną w recenzowanej rozprawie.

### **3. Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, konstrukcyjny, inny)?**

Rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Kabali w przeważającej mierze ma charakter eksperymentalny, głównie projektowy, konstrukcyjny i pomiarowy. Podstawą do rozpoczęcia prac w ramach doktoratu wdrożeniowego była analiza możliwości wdrożenia inteligentnych rozwiązań dedykowanych Internetowi Rzeczy w laboratoriach badających komponenty lotnicze. Taka rzeczowa analiza pozwoliła zidentyfikować potrzeby tych laboratoriów i wskazać możliwe obszary usprawnień, w szczególności w laboratoriach funkcjonujących w strukturze Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Lotnictwa. Należy przy tym zdawać sobie sprawę, że funkcjonuje wiele laboratoriów różniących się obszarem działania, pracujących na rzecz lotnictwa – są to m.in. laboratoria badające materiały stosowane w lotnictwie, laboratoria testujące podzespoły obrotowe, laboratoria prób środowiskowych, laboratoria aerodynamiki, laboratoria testujące podwozia samolotowe, laboratoria systemów sterowania oraz wiele innych. Można w nich spotkać zarówno nieskomplikowane stanowiska badawcze jak i instalacje wielosystemowe z oddzielnymi pomieszczeniami, w których obsługiwane są poszczególne fragmenty stanowiska pomiarowego. Większość badań w laboratoriach lotniczych można przyporządkować do badań wydajnościowo-funkcjonalnych lub badań wytrzymałości na cykle pracy. Podczas testów wydajnościowych sprawdzane są graniczne zakresy pracy poszczególnych komponentów. Dru-

*Edm*

ga grupa badań prowadzonych w laboratoriach lotniczych dotyczy analizy wytrzymałości na cykle pracy komponentów lotniczych. Przegląd literaturowy pozwolił Doktorantowi wybrać trzy obszary badań – bezprzewodowe przetworniki pomiarowe w tym przetworniki telemetryczne, bezprzewodowe ustawniki pozycyjne kontrolujące pracę zaworów oraz systemy monitorowania wycieków po czym opracować projekty, wykonać i przetestować działanie inteligentnych rozwiązań służących ułatwieniu badań we wskazanych powyżej obszarach.

- 4. Czy w rozprawie w sposób właściwy przeprowadzono analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadcząca o dostatecznej wiedzy Autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący? Czy tematyka rozprawy jest aktualna lub dostatecznie ważna?**

Wyniki prac własnych Doktoranta zostały poprzedzone szerokim, rzetelnym, wnikliwym i krytycznym przeglądem zagadnień związanych z problematyką rozprawy. Analiza źródeł jest oparta na 149 pozycjach (a w zasadzie 148, gdyż pozycje 54 i 55 dotyczą tej samej publikacji). Ponad 40% cytowanych prac opublikowano w latach 2020-2024, czyli w ostatnim pięcioleciu. Kolejnych 37% pochodzi z lat 2015-2019. Jest to bardzo rzetelna podbudowa teoretyczna do prac własnych Doktoranta. Przedstawione wyniki studiów literaturowych świadczą o umiejętności korzystania z istniejącej wiedzy, ale także, co ważniejsze, o umiejętności wyciągania z niej właściwych wniosków. Przytoczona liczba wykorzystanych pozycji jak i daty ich opublikowania bezwzględnie przekonują, że tematyka rozprawy jest jak najbardziej aktualna.

- 5. Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienie? Czy użył do tego właściwych metod i czy przyjęte założenia są uzasadnione?**

W rozdziale czwartym Doktorant zaprezentował opracowanie projektów, wykonanie, przetestowanie i w efekcie wdrożenie w Sieci Badawczej Łukasiewicz - Instytucie Lotnictwa czterech inteligentnych bezprzewodowych przetworników pomiarowych.

Pierwsze rozwiązanie dotyczyło uniwersalnego bezprzewodowego przetwornika pomiarowego zasilanego bateryjnie lub radiowo-bateryjnie. Przetwornik ten pozwala na współpracę z rezystancyjnymi czujnikami temperatury, termoparami, czujnikami ciśnienia, tensometrami lub innymi czujnikami z wyjściem napięciowym. Zrealizowane przetwornik znajduje rozwiązanie w badaniach, w których nie ma potrzeby prowadzenia pomiarów z wysoką częstotliwością. Dzięki odpowiedniemu doborowi komponentów elektronicznych i wyborowi metody komunikacji i realizacji pomiarów, ukierunkowanemu na minimalizację zużycia energii, przetwornik może pracować przez kilka miesięcy przy zasilaniu niewielką baterią pastylkową. Może też być zasilany drogą radiową z odległości kilkudziesięciu centymetrów.

Drugie rozwiązanie dotyczyło wielokanałowego, inteligentnego obrotowego modułu telemetrycznego zasilanego indukcyjnie. Doktorant udowodnił, że zaprojektowany i skonstruowany przez niego moduł może pracować z prędkością obrotową 20 000 obr./min. Wdrożenie tego rozwiązania istotnie zwiększa możliwości badawcze Laboratorium Badania Łożysk w SBL – Instytucie Lotnictwa, gdyż pozwala na wykonywanie długoczasowych testów obrotowych.

Przetwornik nr 3 to bezprzewodowy baterijny sterownik ustawnika pozycyjnego o małym zużyciu energii. Autor zaproponował rozwiązanie, w którym między kolejnymi ruchami napędu sterow-

*Edm*

nik ustawnika jest przełączany w tryb uśpienia z bardzo dużą redukcją zużycia energii, ale także ze stabilizacją warunków przed wykonaniem kolejnego kroku. Poprawność pracy ustawnika sprawdzono przy regulacji pozycji oraz przepływu. Badanie przeprowadzone przez Doktoranta potwierdziły dużą dokładność regulacji i zdecydowanie mniejsze zużycie energii w porównaniu z rozwiązaniami dostępnymi na rynku. Pozwala to na zastosowanie takiego bezprzewodowego ustawnika precyzyjnego tak do badań krótko- jak i długoczasowych.

Do monitorowania wycieków Kandydat zaproponował dwa algorytmy pomiarowe. Pierwszy z nich pozwala na wykrywanie wycieków na podstawie wykrywania konturów zmian odpowiadających wyciekom na zarejestrowanym obrazie. Drugi polega na śledzeniu zmian w wybranych obszarach na podstawie zmiany średniej wartości koloru pikseli składających się na dany obszar.

Zaprojektowane, zrealizowane i przebadane inteligentne bezprzewodowe przetworniki i układy pomiarowe, opisane ze znaczną ilością szczegółów technicznych, uwzględniają specyfikę badań komponentów lotniczych. Można zatem stwierdzić, że Doktorant przy realizacji doktoratu wdrożeniowego przyjął uzasadnione założenia po czym w pełni zrealizował cele rozprawy używając do tego właściwych metod oraz sporej dozy wiedzy inżynierskiej. Na uwagę zasługuje też rzetelność Kandydata przy opisie prowadzonych przez niego prac badawczych.

## **6. Na czym polega oryginalny dorobek Autora (najważniejsze osiągnięcia Autora) i jakie jest jego znaczenie poznawcze lub przydatność praktyczna dla nauki bądź techniki?**

Przedstawioną do oceny rozprawę charakteryzuje wysoki stopień innowacyjności i oryginalności w zakresie podjętego tematu. Do najważniejszych osiągnięć Autora zaliczam:

- opracowanie czterech oryginalnych inteligentnych bezprzewodowych przetworników i układów pomiarowych uwzględniających specyfikę badania komponentów lotniczych, w szczególności usprawnienie przygotowania badań komponentów lotniczych, uzyskanie nowych możliwości badawczych oraz uzyskanie długiego czasu pracy przetworników przy zasilaniu bateryjnym (przekraczającego dotychczasowe doniesienia literaturowe) czy też uzyskanie możliwości zasilania bezprzewodowego (radiowego lub indukcyjnego),
- opracowanie programu sterującego pomiarami opracowanych przetworników w środowisku LabVIEW ułatwiającego wdrażanie opracowanych przetworników w laboratoriach Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytucie Lotnictwa.

Wśród zalet rozprawy warto też wymienić zamieszczone przez Autora w niektórych fragmentach rozprawy sformułowania dotyczące dalszych kierunków badań nad modyfikacją rozwiązań zaprezentowanych w rozprawie. Oznacza to, że Doktorant w sensie badawczym utożsamia się z tą tematyką nie tylko na okres realizacji rozprawy doktorskiej, ale widzi w niej pole do swojej dalszej aktywnej działalności naukowej i inżynierskiej co najmniej na okres najbliższych kilku-kilkunastu lat.

## **7. Jakie są wady i słabe strony rozprawy?**

Podczas uważnej lektury rozprawy, oprócz przedstawionych powyżej jej zalet, nasunęło mi się wszakże kilka uwag i spostrzeżeń dyskusyjnych lub o charakterze krytycznym, które przytaczam poniżej:

- a) Każdy ze zrealizowanych przez Doktoranta inteligentnych przetworników pomiarowych po opracowaniu projektu odpowiedniego układu elektronicznego wymagał jego realizacji

*boh*

przez zaprojektowanie odpowiedniej płytki obwodu drukowanego a następnie montaż układu na takiej płytce. Mimo przedstawienia wielu szczegółów technicznych, związanych z uruchamianiem poszczególnych przetworników brakuje informacji o projektowaniu PCB i montażu układów. Czy projektowanie i wykonanie płytek obwodów drukowanych a następnie montaż układów elektronicznych były realizowane samodzielnie przez Autora, czy też całość tych prac, ewentualnie niektóre ich fragmenty były zlecane innym osobom lub firmom zewnętrznym?

- b) Zasilanie systemu telemetrycznego, opisanego w rozdz. 4.2 odbywa się z wykorzystaniem sprzężenia indukcyjnego. W badaniach wykorzystano cewkę drutową o indukcyjności 28,9  $\mu\text{H}$  i cewkę spiralną na płytce obwodu drukowanego o indukcyjności 11,6  $\mu\text{H}$ . Według jakich zależności wyznaczano indukcyjności tych cewek podczas projektowania? Jak wyglądała relacja między indukcyjnością elementów zaprojektowanych i wykonanych? Jakie są wartości parametrów pasożytniczych cewek, w szczególności rezystancji szeregowej i czy nie są one przeszkodą w uzyskaniu większego zakresu pracy modułu zasilającego?
- c) W rozdziale czwartym, który przedstawia opracowane i sprawdzone przez Doktoranta inteligentne przetworniki pomiarowe spełniające wymagania umożliwiające ich wykorzystanie w laboratorium badania komponentów lotniczych nie zamieszczono żadnych odwołań literaturowych z wyjątkiem odwołania do prac współautorskich Doktoranta i Promotora. Tymczasem z pewnością z takowych prac Doktorant korzystał. Przykładem mogą być zależności (4.1), (4.2) i (4.3). Jak jest źródło ich pochodzenia? I przy okazji pytanie – jakiego maksymalnie stopnia wielomian został wykorzystany przez Autora, gdyż w wyrażeniu (4.2) pojawia się niezidentyfikowana liczba  $n$ . Jakie są wartości współczynników występujących w zależnościach (4.2) i (4.3) w odniesieniu do wspomnianej termopary K?
- d) Czy w układzie detekcji wycieków, opisanym w rozdz. 4.4, możliwe jest wykrywanie wycieków oleju w każdym miejscu stanowiska pomiarowego? Ile kamer trzeba użyć do realizacji takiego zadania?

**8. Czy autor wykazał się umiejętnością poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?**

Oceniając organizację recenzowanego materiału stwierdzam, że układ rozprawy, jej struktura, podział treści i kolejność rozdziałów są prawidłowe. Przedstawione założenia, ich realizacja oraz analiza uzyskanych wyników zostały właściwie sformułowane w tekście. Rozprawa liczy 167 stron (w tym 120 rysunków i 14 tabel), na które składa się streszczenie w języku polskim, streszczenie w języku angielskim, pięć rozdziałów merytorycznych, bibliografa, spis rysunków, spis tabel i dwanaście załączników (są to schematy ideowe oraz projekty płytek obwodów drukowanych inteligentnych przetworników i układów pomiarowych opracowanych przez Autora rozprawy). Bibliografia obejmuje łącznie 149 pozycji (w zasadzie 148, gdyż pod numerami 54 i 55 kryje się ten sam artykuł), w tym trzy artykuły w czasopiśmie indeksowanych, których współautorem jest Doktorant. Cytowane prace są ściśle związane z prezentowaną tematyką. Niestety, Doktorant wykorzystał pozycje od [1] do [146] tylko w rozdziałach przeglądowych. Natomiast w kluczowym dla rozprawy rozdziale czwartym odwołuje się jedynie do pozycji współautorskich [147], [148] i [149].

*Edm*

Autor zasadniczo przedstawia tematykę w sposób zrozumiały. Rysunki i schematy są wykonane starannie. Jednak w niektórych fragmentach rozprawy zauważyłem usterki natury redakcyjnej, związane m.in. z nadużywaniem przyimków „poprzez” (około 120 razy) i „pomiędzy” (około 60 razy) zamiast przyimków „przez” i „między”, nadmiernym stosowaniem przymiotników „niski” lub „wysoki” (ponad 70 razy) zamiast określeń „mały” lub „duży”. Przez całą rozprawę przewija się niewłaściwe określenie rezystancyjnego platynowego czujnika temperatury – zamiast poprawnego określenia **Pt1000** (Pt – symbol chemiczny platyny) Autor używa określenia **PT1000**. Dostatecznie traktuje Autor zapis wartości poszczególnych wielkości i ich jednostek (i łącznie, tj. bez spacji, i rozdzielnie). Tymczasem jednostkę od wartości wielkości należy separować spacją za wyjątkiem stopni i procentów. W rozprawie znajduje się także spora liczba błędów interpunkcyjnych, które zapewne są wynikiem stosowania przez Doktoranta niekiedy zbyt długich zdań.

9. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a) nie spełnia stawianych wymagań,
- b) wymaga wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,
- c) spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy,
- d) spełnia stawiane wymagania z nadmiarem,
- e) zasługuje na wyróżnienie.

#### 10. Wniosek końcowy

Moim zdaniem przytoczone powyżej uwagi i zastrzeżenia, tak merytoryczne jak i natury redakcyjnej mają charakter konstruktywny i m.in. powinny przyczynić się do większej precyzji kolejnych prac, których autorem będzie Doktorant. Wprawdzie nieco wpływają one na odbiór rozprawy, ale nie umniejszają przedstawionych wcześniej zasadniczych jej wartości, związanych z opracowaniem i kompleksową charakteryzacją czterech oryginalnych czterech oryginalnych inteligentnych bezprzewodowych przetworników i układów pomiarowych uwzględniających specyfikę badania komponentów lotniczych o zadowalających parametrach metrologiczno-użytkowych i korzystnych relacjach ekonomicznych. **W związku z powyższym stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Tomasza Kabali „Opracowanie inteligentnych bezprzewodowych czujników i układów pomiarowych dedykowanych Internetowi Rzeczy w laboratoriach testów komponentów lotniczych” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez aktualnie obowiązującą Ustawę i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.**

