

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Patryka Sokołowskiego pt. „Opracowanie optycznych metod badania wybranych parametrów tkanek biologicznych oraz ich fantomów

Informacje wstępne

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Patryka Sokołowskiego pt. „Opracowanie optycznych metod badania wybranych parametrów tkanek biologicznych oraz ich fantomów”. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Małgorzata Szczerska. Przewód doktorski został wszczęty przez Radę Naukową Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, w Dziedzinie – Nauki Inżynieryjno-Techniczne. Recenzję przygotowano na podstawie zlecenia Przewodniczącego RN Dyscypliny AEEiTK Politechniki Gdańskiej zgodnie z pismem z dnia 12 marca 2026 r.

Tematyka rozprawy doktorskiej dotyczy opracowania optycznych metod oraz sensorów umożliwiających badanie optycznych parametrów materiałów biologicznych, w tym w szczególności detekcji biomarkerów charakterystycznych dla wirusów i infekcji wirusowych. Aplikacyjny aspekt tej tematyki związany jest bezpośrednio z dyscypliną Inżynieria Biomedyczna. Jednak w pracy Doktorant koncentruje się na modyfikacjach i implementacji metod spektroskopowych i interferometrycznych oraz budowie sensorów światłowodowych wykorzystujących te metody. Fotonika, analiza sygnału optycznego i metrologia, które stanowią podstawę recenzowanej pracy doktorskiej są doskonale umiejscowione w zakresie merytorycznym dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, w ramach której wszczęty został przewód doktorski.

Rozprawa doktorska została opublikowana w języku polskim, w formie monografii liczącej 73 stron maszynopisu zawierającego obszerną bibliografię obejmującą 129 pozycji literatury, z których Pan Sokołowski korzystał w trakcie realizacji swojej pracy i przygotowania manuskryptu. Dodatkowo w skład pracy doktorskiej wchodzi 6 publikacji, w tym pięć opublikowanych artykułów w czasopismach z listy JCR (*Journal of Biophotonics* (3), *Sensors and Actuators Reports* (1), *Photonics Letters of Poland (PLP)* (1)) i jeden artykuł w *Engineering Proceedings*. Dodatkowo w wykazie prac wchodzących w skład pracy doktorskiej (str.5) jest wymieniony manuskrypt jednego artykułu w trakcie recenzji w czasopiśmie *Sensors and Actuators B: Chemical*, jednak manuskrypt ten nie jest załączony, a artykuł, wg. Recenzenta, do dnia 20.06.2026 nie ukazał się. W czterech załączonych publikacjach Pan Sokołowski jest pierwszym autorem, a publikacja w PLP jest jednoautorska. Prace załączone do rozprawy do dnia dzisiejszego mają 33 cytowania co świadczy o wadze i rozpoznawalności prac naukowych realizowanych przez Doktoranta.

1. Tematyka, zakres i cel rozprawy

Czujniki optyczne, w tym szczególnie światłowodowe, mają duże znaczenie w zastosowaniach biomedycznych ze względu na ich unikalne właściwości takie jak: wysoka czułość i dokładność, minimalna inwazyjność, odporność na zakłócenia elektromagnetyczne, niewielkie objętości próbek, biokompatybilność i bezpieczeństwo oraz możliwość działania w czasie rzeczywistym [Mortazavi, Set al., *Trends in Optical Fiber Biosensing for Non-Invasive Biomedical Analysis. Photonics* **2025**, 12, 1202]. Dzięki tym cechom czujniki optyczne znajdują zastosowanie m.in. w diagnostyce, monitorowaniu funkcji życiowych, obrazowaniu medycznym oraz terapii. Do najważniejszych parametrów optycznych materiału

biologicznego należą: współczynnik absorpcji (pomiarów metodami spektroskopowymi), współczynnik załamania (pomiarów metodami interferometrycznymi), współczynnik i anizotropia rozpraszania (metody spektroskopowe, OCT, goniometria). Pomiarów tych wielkości wykorzystywane są w wielu zastosowaniach biomedycznych, wśród których niezwykle ważnym tematem jest detekcja biomarkerów (np. RNA wirusów) lub analiza złożonych materiałów biologicznych. Równocześnie z rozwojem czujników optycznych przeznaczonych do badań ilościowych niezbędne jest zadbanie o poprawną analizę metrologiczną realizowaną przez te czujniki, a w tym przede wszystkim o opracowanie materiału referencyjnego, mimikującego materiał biologiczny i służącego jako materiał walidacyjny nowych optycznych układów pomiarowych. Biorąc pod uwagę powyższe fakty, obecny stan wiedzy i udokumentowane zapotrzebowanie na nowe optyczne metody i sensory biomedyczne jest zasadnym i ważnym z punktu widzenia naukowego i praktycznego sformułowanie przez Doktoranta wielowątkowego celu pracy obejmującego:

- opracowanie i realizację czujników światłowodowych do detekcji biomarkerów;
- implementacje i adaptacje istniejących metod optycznych (spektrometrycznych i interferencyjnych) do nowych zastosowań;
- opracowanie fantomów, które odzwierciedlają optyczne własności cieczy ustrojowych.

W powiązaniu z tymi celami Doktorant sformułował również tezę, która brzmi:

Czujnik światłowodowy zbudowany z wykorzystaniem telekomunikacyjnego światłowodu jednomodowego (TSM) może służyć do efektywnej detekcji wybranego markera w złożonej matrycy biologicznej.(str. 10 w pracy)

Tak ogólnie sformułowana teza, w kontekście obecnego stanu wiedzy, właściwie nie wymaga udowodnienia, gdyż zostały już opracowane liczne sensory wykorzystujące TSM do detekcji różnorodnych biomarkerów (co zresztą Doktorant przedstawił m.in. w Tab.1). Jednak w kontekście konkretnych, proponowanych w pracy, rozwiązań sensorycznych, teza jest zasadna, a jej udowodnienie stanowi kluczowy element rozprawy doktorskiej.

Na pracę doktorską składają się: streszczenia w języku polskim i angielskim, siedem rozdziałów, spis rysunków i skrótów, obszerna bibliografia oraz kopie 6 publikacji. W kolejnych rozdziałach Doktorant opisuje cel i główne zadania badawcze (Rozdz.1), projekt i realizację interferencyjnych czujników światłowodowych do detekcji biomarkerów (detekcja RNA wirusa i detekcja białka immunoglobuliny G) (Rozdz.2), a następnie implementację technik spektroskopowych do nowych zastosowań, w tym do klasyfikacji pacjentów ze stanem uroseptycznym (Rozdz.3) i nadzoru zmian stężenia CRP w ściekach (Rozdz.4). W rozdziałach 5 i 6 Doktorant skupił się na tematyce fantomów imitujących tkanki i cieczy ustrojowe (mocz), jako niezbędnych elementów służących do walidacji metod optycznych. W rozdziale 5 przedstawiono wyniki badań współczynnika załamania wybranych produktów spożywczych imitujących właściwości tkanek, natomiast w rozdziale 6 zaprezentowano opracowany fantom moczu i wyniki jego charakterystyki. Rozprawę doktorską kończy rozdział 7, w którym w pierwszej sekcji podsumowano wyniki naukowe i techniczne zaprezentowane w pracy, następnie Doktorant podsumował inne osiągnięcia naukowe, w tym współautorstwo przy składaniu zgłoszeń patentowych, prezentacje konferencyjne, udział w projektach i działalność popularnonaukowa. W ostatniej sekcji zaprezentowane zostały niezwykle skrótowo dalsze plany badawcze Doktoranta.

Podsumowując tę część recenzji stwierdzam, że podjęta w pracy tematyka jest aktualna i ważna zarówno naukowo jak i praktycznie, metodyka badawcza zastosowana przez Doktoranta jest poprawna, a jej implementacja doprowadziła do realizacji celu rozprawy.

2. Ocena wartości naukowej i praktycznych aspektów pracy

Rozprawa doktorska Pana Patryka Sokołowskiego ma charakter interdyscyplinarny. Dotyczy zagadnień naukowo-technicznych z zakresu nie tylko szeroko rozumianej fotoniki i optoelektroniki, ale również

szeroko odnosi się do inżynierii biomedycznej, chemii, metrologii a także implementacji metod sztucznej inteligencji w celu efektywnego przetwarzania sygnału. Ważnym aspektem rozprawy jest możliwość praktycznej aplikacji jej rezultatów w obszarach medycyny, zagrożeń epidemiologicznych oraz ochrony środowiska.

Uważam, że **teza pracy została udowodniona** w odniesieniu do opracowanych czujników światłowodowych, a **cele pracy sformułowane w rozdziale 1 rozprawy, zostały osiągnięte** poprzez analizy, badania i realizacje wybranych czujników.

Do oryginalnych rozwiązań problemów naukowych przedstawionych w pracy zaliczam:

- **zapropozowanie i implementacja pełnej metodyki detekcji RNA wirusów (art.A) i innych elementów złożonej matrycy biologicznej (art.C)** z wykorzystaniem interferencyjnego czujnika światłowodowego z biofunkcjonalizowaną mikrosferą. Doktorant wykazał, że w zależności od biomarkera docelowego można dobrać odpowiednią warstwę funkcjonalną i efektywnie wykrywać wybrany marker w złożonej matrycy biologicznej.

- **zapropozowanie metodyki i procedur pomiarowych z wykorzystaniem metod spektroskopii absorpcyjnej do analizy zmian moczu (art.D)** związanych ze stanami uroseptycznymi (wspomaganie klasyfikacji zmian w moczu spowodowanych przez zakażenie układu moczowego (ZUM) oraz stanu urosepsy). Opracowana metoda oparta jest na analizie metabolitów (a nie moczu) w ograniczonym zakresie widmowym (600-750nm), co pozwala uniknąć bezpośredniego wpływu bakterii i innych cząstek rozpraszających na pomiar widma absorpcyjnego. Doktorant wykazał, że istnieją subtelne różnice w widmach absorbancji dla próbek pobranych od pacjentów z ZUM i urosepsą oraz, że istnieje możliwość rozróżnienia obu grup zwłaszcza z zastosowaniem dedykowanych algorytmów uczenia maszynowego.

- **implementacja spektroskopii absorpcyjnej UV-VIS do nadzoru biomarkerów w ściekach (art.E).** Metoda pomiarowa z klasyfikacją próbek z wykorzystaniem algorytmów uczenia maszynowego umożliwia monitorowanie niskich stężeń biomarkerów w złożonych płynnych matrycach biologicznych (ściekach) w czasie rzeczywistym i bez dodatkowych znaczników.

- **opracowanie fantomu sztucznego moczu imitującego absorpcję moczu** w zakresie UV-VIS z wykorzystaniem łatwo dostępnych składników. Wobec braku na rynku takich fantomów jest to ważne osiągnięcie z punktu widzenia walidacji metod, kalibracji urządzeń diagnostycznych i porównania wyników między laboratoriami.

Do ważnych elementów związanych z przyszłymi pracami aplikacyjnymi i wdrożeniowymi zaliczam:

- **realizację i badania 3 głowic pomiarowych czujników z mikrosferą** dla potrzeb selektywnej detekcji immunoglobiny G i RNA wirusa na przykładzie SARS-CoV-2 i grypy typu A. Pierwszy z czujników ma szansę na praktyczne wykorzystanie w monitorowaniu dynamiki zmian stężenia przeciwciał w ściekach, a po integracji z algorytmami uczenia maszynowego może stanowić ważny element systemu wczesnego ostrzegania o zagrożeniach epidemiologicznych. Dwa następne stanowią przykłady czujników służących do szybkiej diagnostyki pacjentów, docelowo w celu prowadzenia nadzoru epidemiologicznego.

- **implementacja metody spektrometrii absorpcyjnej i przeprowadzenie obszernych badań potwierdzających skuteczność tej metody** wspomaganą algorytmami uczenia maszynowego do:

- (1) klasyfikacji pacjentów z ZUM i urosepsą (97% dokładność). Metoda ta ma szansę stanowić alternatywę dla obecnych czasochłonnych procedur.

- (2) nadzoru zmian stężenia białka CPR w ściekach (68,1% dokładność). Doktorant zaproponował miniaturyzację układu optycznego nadzoru ścieków i koncepcję prototypu systemu wdrożeniowego;

- **zapropozowanie wykorzystania konfiguracji interferometru F-P do pomiaru współczynnika załamania** wybranych produktów spożywczych w funkcji temperatury i **implementacja tej metody** w celu uzyskania wartości RI w bliskiej podczerwieni (typowo pomiary na refraktometrze przeprowadzane dla VIS). Uzyskane przez Doktoranta wyniki systematycznych pomiarów, mogą wskazać materiały do

wytworzenia fantomów tkanek (żółtko i białko jajek [F]) oraz stanowić podstawę do detekcji zmian optycznych w ramach monitorowania jakości produktów spożywczych.

Wyniki prac Doktorant opublikował w pięciu współautorskich i jednym jednoautorskim artykule. Pięć publikacji ukazało się w czasopismach z listy JCR. W czterech publikacjach Pan Sokołowski jest pierwszym autorem, a publikacje były już cytowane 33 razy, co dodatkowo **potwierdza walory naukowe pracy**.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa ma znaczną wartość naukową i praktyczną oraz stanowi udokumentowanie posiadania przez Doktoranta pogłębionej wiedzy z zakresu dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne dotyczącej istoty badanych zjawisk fizycznych, budowy czujników bazujących na tych zjawiskach i badań eksperymentalnych oraz analizy czynników mających wpływ na przebieg eksperymentu. Tym samym stwierdzam, że Doktorant wykazał się odpowiednią wiedzą i umiejętnościami pretendującymi Go do uzyskania stopnia doktorskiego.

3. Zastrzeżenia, uwagi krytyczne i dyskusyjne

W trakcie recenzowania rozprawy recenzent sformułował zbiór niżej zamieszczonych uwag dwójakiej natury. Pierwsze z nich to uwagi merytoryczne, które zdaniem recenzenta stanowią zauważone błędy lub niedociągnięcia w pracy, drugie - to uwagi typu dyskusyjnego. Odpowiedź na tę drugą kategorię powinna być źródłem konstruktywnej dyskusji z Doktorantem w trakcie obrony publicznej. Jednocześnie ze względu na dążenie do ograniczenia objętości recenzji, uwagi nie są poprzedzone wprowadzeniem i w konsekwencji mogą być zrozumiałe jedynie w kontekście pracy.

Jednak pierwsza moja uwaga dotyczy **braku manuskryptu artykułu [B]**, na który Doktorant powołuje się w pracy i który miał stanowić pracę wchodzącą w skład pracy doktorskiej. Recenzent rozumie, że w momencie składania pracy artykuł był w recenzji, jednak Doktorant albo powinien manuskrypt umieścić w doktoracie, albo usunąć go z „Wykazu prac wchodzących w skład pracy doktorskiej”. Recenzent próbował sprawdzić czy artykuł został opublikowany w *Sensors and Actuators B: Chemical* jednak wg. najlepszej wiedzy Recenzenta nie ukazał się on jeszcze w druku w tym czasopiśmie.

Uwagi i pytania merytoryczne:

- czas odpowiedzi sensora z mikrosferą jest stosunkowo krótki (1-kilku minut, Tab.2) natomiast przygotowanie sensora do pomiaru jest dość skomplikowane i czasochłonne (kilkadziesiąt godzin). Czy jest możliwość przyspieszenia tej procedury? Ilokrótne użycie sensora jest możliwe (po przepłukaniu)?
- Limity detekcji opracowanego czujnika podane w Tab.1 (str.14) oraz w Tab. 1 artykuł [A] różnią się (0.1fM versus 1pM), proszę o wyjaśnienie;
- zarejestrowane widma przedstawione na Rys.4 i 5 są gładkie, natomiast na Rys.6 –obarczone wysokoczęstotliwościowym szumem. Skąd ta różnica?
- na Rys.7 punkty pomiarowe zmiany intensywności widma przedstawiono bez oszacowania standardowego odchylenia wartości. Proszę o oszacowanie.
- proponowany i zaimplementowany zakres spektralny wykorzystywany do klasyfikacji zagrożenia uro-sepsą to 600-750nm, natomiast widmo optyczne moczu zdrowych pacjentów i fantomu moczu jest w zakresie 240-500nm. Proszę o wytłumaczenie braku korelacji między tymi zakresami.
- w Tabeli 8 podano zakresy pomiarowe współczynnika załamania przy pomiarach z wykorzystaniem interferometru F-P. Nie pokrywają się one z przeprowadzonymi pomiarami np. RI mleka krowiego to ponad 1.35 dla temperatury 30deg, RI dla żółtka kurzego to wartości 1.48do 1.30, natomiast podany zakres pomiarowy to 1.21-1.30. Proszę o wyjaśnienie.

- w artykułach [C], [D], [E] zaproponowano rozwiązania klasyfikacji danych z wykorzystaniem uczenia maszynowego, dla Recenzenta nie jest jasne na ile Doktorant był zaangażowany w te prace. Proszę o wyjaśnienie.

- czy przy pomiarach RI białka i żółtka jaj kurzych w funkcji temperatury nie było problemów z „wysychaniem” próbki? Jaki mogło to mieć wpływ na pomiary?

Uwagi dyskusyjne:

- w Rozdz. 7 przedstawił Pan w sposób bardzo skrótowy dalsze plany badawcze związane z rozwojem czujników i fantomów. Proszę o rozszerzenie tego tematu, a szczególnie omówienie podstawowych problemów, które mogą utrudniać przejście z badań laboratoryjnych do wersji klinicznych czujników oraz dalszą perspektywę (zapotrzebowanie medyczne) na tego typu sensory (uwzględniając przy tym konkurencyjność innych sensorów z podobną funkcjonalnością i możliwości komercjalizacyjne).

-obecnie obserwuje się dużo prac poświęconych budowie czujników (w tym również tzw. „wearable”) z wykorzystaniem fotonicznych układów scalonych (Photonics Integrated Chips (PIC)), w których obok miniaturowego czujnika (często światłowodowego) znajduje się źródło światła, tor wiązki, detektor lub zminiaturyzowany układ spektrometryczny. Na ile takie rozwiązania byłyby przydatne do Pana czujników i rozważanych przez Pana zastosowań?

Recenzowana praca napisana została przejrzyście i przygotowana z odpowiednią dbałością o stronę graficzną i edycyjną. Mimo to recenzent wskazuje na kilka drobnych uchybień np.:

- w tekście wielokrotnie występują złe końcówki słów;
- kilkakrotnie niewłaściwie używany jest wyraz „ilość” (zamiast „liczba”,
- w bibliografii w różnych pozycjach stosowane są różne metody cytowania (brak ujednolicenia).

Powyższe uwagi merytoryczne i dyskusyjne nie podważają wartości pracy, którą oceniam jednoznacznie pozytywnie.

4. Podsumowanie

W podsumowaniu niniejszym stwierdzam, iż przedłożona rozprawa doktorska mgr inż. Patryka Sokołowskiego spełnia wymogi w świetle obowiązującej *Ustawy - Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z 20.07.2018r* (tj. Dz.U. z 2024r. poz.1571 z późniejszymi zmianami) zarówno co do wymaganego dorobku naukowego (trzy artykuły w czasopiśmie *Journal of Biophotonics*), zaprezentowania przez Doktoranta ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a przede wszystkim jako oryginalnego rozwiązania problemu naukowego. **Stawiam więc wniosek o przyjęcie pracy jako rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie do publicznej obrony.**

