

Prof. dr hab. inż. Marcin Kochanowicz
Politechnika Białostocka
Wydział Elektryczny
Katedra Fotoniki, Elektroniki
i Techniki Świetlnej
e-mail: m.kochanowicz@pb.edu.pl

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej kpt. mgr inż. Filip Musiałka pt. „Wyznaczanie stężenia gazu w układach laserowej spektroskopii absorpcyjnej z modulacją długości fali za pomocą metody z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych”

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska kpt. mgr inż. Filip Musiałka pt. „Wyznaczanie stężenia gazu w układach laserowej spektroskopii absorpcyjnej z modulacją długości fali za pomocą metody z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych”, której promotorem jest płk. dr hab. inż. Jacek Wojtas, Prof. WAT, zaś promotorem pomocniczym dr inż. Dariusz Szabra. Recenzja została na zlecenie prof. dr. hab. inż. Ryszarda Szpleta – Zastępcy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej AEEiTK Wojskowej Akademii Technicznej – (pismo z dnia 13 lipca 2026).

Sylwetka naukowa doktoranta

Kpt. mgr inż. Filip Musiałek jest absolwentem Wojskowej Akademii Technicznej, gdzie ukończył studia I i II stopnia na kierunku Mechatronika w specjalności Radioelektronika Przeciwlotniczych Zestawów Rakietowych. Obie prace dyplomowe zostały wyróżnione w konkursach dziekańskich, a praca magisterska dodatkowo w konkursie im. prof. Adama Smolińskiego. W latach 2020-2022 pełnił służbę wojskową jako dowódca plutonu technicznego w 33. Dywizjonie Rakietowym Obrony Powietrznej, a od 2022 r. jest zatrudniony w Instytucie Optoelektroniki WAT. W 2026 r. ukończył kształcenie w Szkole Doktorskiej WAT. Jego zainteresowania naukowe obejmują laserową spektroskopię absorpcyjną, optoelektronikę, cyfrowe przetwarzanie sygnałów, uczenie maszynowe, sztuczne sieci neuronowe oraz algorytmy ewolucyjne. Dorobek naukowy obejmuje 7 publikacji w czasopismach naukowych, w tym w renomowanych czasopismach: *Sensors* oraz *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, a także 7 referatów prezentowanych na krajowych konferencjach naukowych. Był kierownikiem projektu badawczego dotyczącego wykorzystania sztucznej inteligencji do identyfikacji substancji niebezpiecznych w układach laserowej spektroskopii absorpcyjnej oraz współwykonawcą projektów finansowanych przez EDA, NATO i NCBR.

Dynamiczny rozwój technik fonicznych przeznaczonych do analizy gazów powoduje rosnące zapotrzebowanie na układy pomiarowe o wysokiej czułości oraz krótkim czasie odpowiedzi. Szczególne znaczenie mają obecnie metody laserowej spektroskopii absorpcyjnej, wykorzystywane w monitorowaniu środowiska, diagnostyce medycznej, przemyśle energetycznym, monitorowaniu procesów spalania, detekcji wycieków gazów oraz w systemach bezpieczeństwa. Wśród nich istotną pozycję zajmuje laserowa spektroskopia absorpcyjna z modulacją długości fali (WMS), umożliwiającą realizację pomiarów stężeń gazów o bardzo niskich stężeniach przy zachowaniu wysokiej odporności na zakłócenia i korzystnego stosunku sygnału do szumu. Pomimo licznych zalet techniki WMS, istotnym problemem pozostaje poprawne wyznaczanie stężenia gazu w warunkach zmiennego ciśnienia i temperatury, co może prowadzić do znaczących błędów. Tradycyjne metody bazujące na pomiarze wartości maksymalnej sygnału zapewniają krótki czas odpowiedzi, jednak charakteryzują się dużą wrażliwością na zmiany parametrów gazu. Z kolei metody wykorzystujące dopasowanie sygnałów symulacyjnych do eksperymentalnych pozwalają ograniczyć ten problem kosztem znacznego wydłużenia czasu obliczeń i finalnie uzyskania wyniku pomiaru. Autor słusznie wskazuje i uzasadnia, że w metan jest jednym z głównych gazów cieplarnianych i będzie miał wielokrotnie większy wpływ na efekt cieplarniany niż CO_2 . Dlatego też, istnieje duże zapotrzebowanie na opracowanie analizatorów stężenia metanu umożliwiających pomiar z dużą dokładnością, krótkim czasie odpowiedzi, przy zmiennych warunkach oraz szerokim zakresie pomiarowym. Równocześnie, w ostatnich latach obserwowany jest jednocześnie bardzo intensywny rozwój sztucznych sieci neuronowe, które wykazują zdolność modelowania złożonych, nieliniowych zależności oraz bardzo szybkiego przetwarzania danych po zakończeniu procesu uczenia. Powoduje to, że techniki te są coraz częściej rozpatrywane jako narzędzia wspomagające analizę sygnałów spektroskopowych oraz konstrukcję nowoczesnych systemów pomiarowych. W tym obszarze badawczym znajduje się rozprawa doktorska kpt. mgr inż. Filip Musiałka pt. „Wyznaczanie stężenia gazu w układach laserowej spektroskopii absorpcyjnej z modulacją długości fali za pomocą metody z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych”. Autor skoncentrował swoje badania na opracowaniu nowych metod wyznaczania stężenia metanu w układach WMS z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych oraz na ocenę ich przydatności w praktycznych systemach pomiarowych. Szczególną uwagę poświęcono problemowi minimalizacji wpływu zmian ciśnienia i temperatury gazu przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej dokładności oraz krótkiego czasu odpowiedzi analizatora. Badania przeprowadzono na autorskim laboratoryjnym analizatorze metanu wykorzystującym pasmo absorpcyjne CH_4 w zakresie około 3270 nm. Ambitnym celem rozprawy było opracowanie nowej metody wyznaczania stężenia gazu w technice WMS, która będzie jednocześnie charakteryzowała się dużą dokładnością, krótkim czasem odpowiedzi oraz możliwością ograniczenia wpływu zmian temperatury i ciśnienia gazu na wynik pomiaru.

Stwierdzam, że podjęta przez Doktoranta tematyka jest aktualna, ważna zarówno z naukowego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia oraz wpisuje się w światowe trendy rozwoju fotoniki, technik spektroskopowych i metod sztucznej inteligencji wykorzystywanych w

systemach pomiarowych. Sformułowany problem badawczy jest jasno określony, a przyjęte cele pracy odpowiadają wyzwaniom współczesnej metrologii optycznej.

Układ pracy

Przedstawiona do oceny rozprawa liczy 148 stron i została podzielona na siedem rozdziałów merytorycznych. Pracę uzupełniają bibliografia obejmująca 163 pozycje literaturowe oraz załączniki zawierające fragmenty kodów źródłowych opracowanych modeli sztucznych sieci neuronowych.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do problematyki rozprawy. Autor przedstawia znaczenie technik laserowej spektroskopii absorpcyjnej w nowoczesnych zastosowaniach przemysłowych, środowiskowych i medycznych, jednocześnie wskazując ograniczenia istniejących metod wyznaczania stężenia gazów. Szczególną uwagę poświęcono technice WMS oraz potencjałowi wykorzystania sztucznej inteligencji w analizie sygnałów spektroskopowych.

Rozdział drugi zawiera bardzo obszerną analizę aktualnego stanu wiedzy. Omówiono podstawy fizyczne spektroskopii absorpcyjnej TLAS i WMS, przedstawiono modele matematyczne opisujące proces absorpcji promieniowania oraz dokonano krytycznej analizy metod wyznaczania stężenia gazów stosowanych obecnie w analizatorach WMS. Kluczowym elementem rozdziału jest szczegółowy przegląd literatury dotyczący wykorzystania uczenia maszynowego i sztucznych sieci neuronowych w spektroskopii absorpcyjnej. Na podstawie przeprowadzonej analizy Autor trafnie identyfikuje istniejącą lukę badawczą i uzasadnia potrzebę podjęcia przedstawionych badań.

W rozdziale trzecim sformułowano cel, tezę oraz zadania badawcze rozprawy. Rozdział ten stanowi logiczne podsumowanie analizy literaturowej i wyznacza kierunek dalszych prac obliczeniowych oraz eksperymentalnych.

Rozdział czwarty poświęcony został opracowanemu przez Autora laboratoryjnemu analizatorowi metanu wykorzystującemu technikę WMS. Szczegółowo opisano budowę układu optycznego, elektronicznego oraz systemu przygotowania próbek gazowych. Następnie przedstawiono badania charakteryzujące parametry lasera, komórki absorpcyjnej, detektora optycznego, układu przetwarzania sygnałów oraz źródeł szumów. Ważnym elementem rozdziału jest analiza wpływu ciśnienia i temperatury na wskazania analizatora bazującego na klasycznym podejściu wykorzystującym pomiar wartości maksymalnej sygnału.

Rozdział piąty zawiera opis autorskich metod wykorzystujących sztuczne sieci neuronowe. Autor przedstawia proces generowania i gromadzenia dużych zbiorów danych spektroskopowych, opracowanie dwóch modeli neuronowych oraz konstrukcję sieci autoenkodera przeznaczonego do redukcji szumu sygnałów wejściowych. Rozdział należy uznać za jedną z kluczowych części pracy, gdyż zawiera oryginalne rozwiązania stanowiące zasadniczy wkład Doktoranta do rozwoju analizatorów WMS.

W rozdziale szóstym przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych analizatora wyposażonego w opracowane modele sztucznych sieci neuronowych. Dokonano oceny poprawności i precyzji wyznaczania stężenia metanu, a także przeprowadzono badania wpływu zmian temperatury i ciśnienia gazu na wyniki pomiarów. Uzyskane rezultaty pozwalają na

bezpośrednie jakościowe oraz ilościowe porównanie opracowanych przez Doktoranta metod z rozwiązaniami klasycznymi oraz stanowią podstawę do weryfikacji postawionej tezy rozprawy. Rozdział siódmy stanowi podsumowanie pracy. Autor syntetycznie przedstawia najważniejsze osiągnięcia rozprawy, odnosi uzyskane wyniki do aktualnego stanu wiedzy oraz formułuje kierunki dalszych badań. W sposób przekonujący wykazuje również stopień realizacji celu pracy oraz potwierdzenia postawionej tezy badawczej.

Stwierdzam, że układ rozprawy jest logiczny, przejrzysty i w pełni odpowiada przyjętej metodyce prowadzenia badań naukowych. Poszczególne rozdziały tworzą spójną całość od analizy problemu badawczego, poprzez opracowanie metodyki i narzędzi badawczych, aż do weryfikacji eksperymentalnej oraz sformułowania końcowych wniosków. Strukturę pracy oceniam jednoznacznie bardzo wysoko.

Ocena pracy

Analiza przedstawionej rozprawy doktorskiej pozwala stwierdzić, że ma ona charakter interdyscyplinarny, łącząc zagadnienia z zakresu laserowej spektroskopii absorpcyjnej, technik pomiarowych oraz metod sztucznej inteligencji. Praca została konsekwentnie ukierunkowana na rozwiązanie konkretnego problemu badawczego, jakim jest opracowanie metody wyznaczania stężenia gazów w układach spektroskopii absorpcyjnej z modulacją długości fali (WMS), charakteryzującej się wysoką dokładnością, krótkim czasem odpowiedzi oraz ograniczoną wrażliwością na zmiany parametrów środowiskowych. Należy podkreślić, że problem ten ma istotne znaczenie zarówno poznawcze, jak i praktyczne, ponieważ wpływ temperatury i ciśnienia gazu stanowi jedno z podstawowych ograniczeń współczesnych analizatorów wykorzystujących technikę WMS.

W części literaturowej doktorant przedstawia podstawy teoretyczne absorpcyjnych metod spektroskopowych absorpcyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem technik DAS oraz WMS. Omówił mechanizmy oddziaływania promieniowania z materią, generację sygnałów harmonicznym oraz metody wyznaczania stężenia gazów wykorzystywane obecnie w tego typu analizatorach. Na podkreślenie zasługuje część poświęcona zastosowaniom sztucznych sieci neuronowych i metod uczenia maszynowego w analizie danych w analizatorach gazu. Świadczy ona o bardzo dobrej znajomości przez doktoranta zarówno zagadnień związanych ze spektroskopią absorpcyjną, jak również współczesnych metod analizy danych za pomocą uczenia maszynowego. Autor prawidłowo identyfikuje istniejące ograniczenia metod klasycznych oraz wskazuje lukę badawczą, która uzasadniła podjęcie przedstawionych badań. Pewnym niedosytem pozostaje jednak ograniczona dyskusja porównawcza najnowszych rozwiązań opartych na sztucznej inteligencji rozwijanych obecnie przez inne zespoły badawcze.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej doktorant formułuje tezę badawczą oraz cele rozprawy. Uważam, że zostały one określone w sposób jasny i logiczny. Pierwszym, ważnym etapem do opracowania założonego analizatora metanu było określenie źródeł szumów i na tej podstawie obliczenie na zakresu pomiarowego. Dalej doktorant analizuje symulacyjnie wpływ temperatury oraz ciśnienia opracowanego analizatora metanu na górny i dolny zakres pomiarowy (2 ppb do 2300 ppm). Na tej podstawie opracowano laboratoryjny analizator metanu. Autor szczegółowo opisuje zastosowane źródło

promieniowania, tor optyczny, układ przygotowania mieszanin gazowych oraz elektronikę pomiarową i system akwizycji danych. Co istotne, wyznacza podstawowych parametrów metrologicznych analizatora. Weryfikacja działania systemu metodą DAS wykazała dobrą zgodność wyników eksperymentalnych z symulacjami opartymi na bazie HITRAN, potwierdzając poprawność przyjętych modeli oraz konstrukcji stanowiska badawczego.

W wyniku badań wykorzystujących technikę WMS Autor dobrał optymalne parametry przestrajania i modulacji lasera oraz określił właściwości metrologiczne analizatora bazującego na klasycznej metodzie wyznaczania stężenia poprzez analizę wartości maksymalnej sygnału $R_{2f/1f}$. Uzyskano czas rejestracji pojedynczego sygnału wynoszący 0,7 s oraz ponad trzykrotnie lepszą precyzję pomiaru w porównaniu z techniką DAS. Maksymalna precyzja wyznaczona na podstawie dewiacji Allana osiągnęła wartość $3\sigma = 360$ ppb.

Szczególnie ważnym aspektem była analiza wpływu temperatury i ciśnienia gazu na wyniki pomiarów. Autor wykazał, że zmiany tych parametrów znacząco wpływają na kształt sygnałów WMS oraz na dokładność wyznaczania stężenia. Dla próbki referencyjnej o stężeniu 100 ppm średni względny błąd wyznaczania stężenia osiągnął wartość $\Omega_{p,t} = 33\%$, co jednoznacznie wskazuje na ograniczenia klasycznej metody pomiarowej i uzasadnia potrzebę opracowania nowych algorytmów przetwarzania sygnałów. Na uwagę zasługuje kompleksowy charakter przeprowadzonych prac eksperymentalnych oraz szeroki zakres badań wykonanych dla różnych wartości stężenia, temperatury i ciśnienia. Przedstawione wyniki świadczą o bardzo dobrym opanowaniu przez doktoranta zagadnień związanych z konstrukcją spektroskopowych układów sensorowych oraz prowadzeniem zaawansowanych eksperymentów pomiarowych. Za najważniejszą część rozprawy uważam badania dotyczące wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do wyznaczania stężenia gazu. Autor opracował dwa autorskie modele neuronowe oraz zastosował autoenkoder przeznaczony do redukcji szumu w sygnałach pomiarowych. Szczególnie cenne jest przeprowadzenie szczegółowej analizy procesu uczenia sieci neuronowych (na opracowanych danych) oraz ocena wpływu parametrów modeli na uzyskiwane rezultaty. Należy podkreślić, że przeniesienie metod sztucznej inteligencji na grunt laserowej spektroskopii absorpcyjnej wymagało nie tylko znajomości algorytmów uczenia maszynowego, ale również zrozumienia fizycznych podstaw generacji i przetwarzania sygnałów WMS. Doktorant wykazał się w tym zakresie dużą samodzielnością i dojrzałością badawczą.

Na podkreślenie zasługuje również wykorzystanie zarówno danych eksperymentalnych, jak i sygnałów generowanych numerycznie. Takie podejście umożliwiło przygotowanie rozbudowanych zbiorów uczących niezbędnych do skutecznego trenowania modeli neuronowych (aż 200 tys. sygnałów). Uzyskane wyniki poddano analizie parametrów metrologicznych, pozwalającej na obiektywną ocenę opracowanych metod. Opracowane metody dały bardzo dobre, powyżej „state of art”, wyniki metrologiczne. Wyniki badań eksperymentalnych pokazały $MAPE < 3\%$ (metoda WMS-A) oraz $MAPE < 6\%$ (metoda WMS-B) przy czasie odpowiedzi krótszym niż 50 ms. Co ważne uwzględnione zostały tu wyniki pomiarów przy różnych ciśnieniach oraz temperaturach gazu, co wprost udowodniło postanowioną przez doktoranta tezę oraz potwierdziło słuszność przyjętej koncepcji badawczej. Autor jednoznacznie wykazał, że zastosowanie sztucznych sieci neuronowych pozwala znacząco ograniczyć wpływ zmian temperatury i ciśnienia na dokładność wyznaczania stężenia metanu. Jednocześnie zaproponowane rozwiązanie zachowuje krótki czas przetwarzania

danych, co stanowi jego istotną przewagę nad metodami opartymi na numerycznym dopasowywaniu modeli teoretycznych do danych eksperymentalnych. Uważam, że jest to jeden z najważniejszych rezultatów przedstawionej rozprawy. Na uwagę zasługuje fakt, że realizacja pracy wymagała połączenia wiedzy z zakresu fotoniki, spektroskopii, elektroniki, programowania oraz metod sztucznej inteligencji. Doktorant wykazał się umiejętnością integrowania wiedzy i umiejętności pochodzących z powyższych obszarów badawczych oraz ich praktycznego wykorzystania w rozwiązaniu postawionego problemu naukowego.

Uwagi wynikające z lektury rozprawy

Recenzując rozprawę doktorską kpt. Mgr. inż. Filipa Musiałka stwierdzam, że została ona przygotowana starannie i nie zawiera błędów merytorycznych. Przedstawione poniżej uwagi mają charakter dyskusyjny i służą pogłębieniu interpretacji uzyskanych wyników:

1. W pracy wyznaczono współczynnik przestrajania temperaturowego z dokładnością do 5 miejsc po przecinku (rys. 4.6 oraz rys. 4.8). Natomiast rozdzielczość pomiaru widma wynosiła 0,13 nm?
2. Dlaczego pomiary prowadzono przy stężeniu gazu max. 100 ppm? Granica teoretyczna jest dużo większa. Jak zdaniem autora zachowywałby się analizator przy szybkich zmianach stężenia gazu większego niż badane 100 ppm oraz z czego może wynikać niewielkie przeregulowanie widoczne na rys. 6.4?
3. Proszę o uzasadnienie wyboru zastosowanych architektur sieci neuronowych.
4. Czy analizowano wpływ liczebności zbioru uczącego na uzyskiwane rezultaty?
5. Pewnym mankamentem pracy jest stosunkowo ograniczona analiza kosztów obliczeniowych opracowanych modeli neuronowych.
6. Proszę o komentarz dotyczący możliwości implementacji opracowanych modeli w systemach czasu rzeczywistego wykorzystujących mikrokontrolery lub układy FPGA.

Powyższe uwagi mają charakter uzupełniający i nie podważają wysokiej oceny naukowej oraz merytorycznej rozprawy.

Końcowa ocena rozprawy

Podsumowując, stwierdzam, że kpt. mgr inż. Filip Misiałek rozwiązał postawiony w rozprawie problem badawczy, wymagający zarówno głębokiej znajomości zagadnień teoretycznych, jak i zaawansowanych kompetencji praktycznych w obszarze fotoniki, metrologii oraz sztucznych sieci neuronowych. Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych, prawidłowego planowania eksperymentów, opracowywania modeli obliczeniowych oraz krytycznej interpretacji uzyskanych rezultatów. Przedstawione wyniki badań stanowią istotny wkład Autora w rozwój metod analizy sygnałów stosowanych w laserowej spektroskopii absorpcyjnej. Opracowane rozwiązania posiadają zarówno wartość naukową, jak i znaczny potencjał aplikacyjny związany z konstrukcją nowoczesnych analizatorów gazów.



W związku z czym stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowych oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (z późn. zmian) i wnioskuję o jej do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Ponadto, na podstawie przedstawionych w recenzji osiągnięć oraz wysokiego poziomu merytorycznego rozprawy oraz bardzo dobrego dorobku publikacyjnego wnioskuję o jej wyróżnienie.

