

Recenzja rozprawy doktorskiej

pt. **"Wyznaczanie stężenia gazu w układach laserowej spektroskopii absorpcyjnej z modulacją długości fali za pomocą metody z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych"** autorstwa **kpt. mgra inż. Filipa Musiałka**,

opracowana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Wojskowej Akademii Technicznej
im. Jarosława Dąbrowskiego z dnia 8.07.2026 (nr 33/RDN AEEiTK/2026)

1. Tematyka rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska poświęcona jest zagadnieniu wyznaczania stężenia gazów za pomocą laserowej spektroskopii absorpcyjnej z modulacją długości fali (WMS), ze szczególnym uwzględnieniem zastosowania sztucznych sieci neuronowych do przetwarzania sygnałów pomiarowych. Łączy ona zagadnienia z zakresu optoelektroniki, spektroskopii laserowej, cyfrowego przetwarzania sygnałów, algorytmów sztucznej inteligencji oraz uczenia maszynowego. Laserowa spektroskopia absorpcyjna znajduje obecnie szerokie zastosowanie w pomiarach stężenia gazów, między innymi w monitorowaniu środowiska, diagnostyce medycznej, kontroli procesów przemysłowych, systemach bezpieczeństwa oraz w badaniach procesów spalania. Jednakże wyznaczanie stężenia gazu na podstawie uzyskiwanych sygnałów stanowi złożony problem, ponieważ ich kształt i amplituda zależą nie tylko od samego stężenia, ale również od temperatury i ciśnienia gazu, a także od parametrów zastosowanego układu optoelektronicznego. W dotychczas stosowanych rozwiązaniach wykorzystujących technikę WMS stężenie gazu wyznacza się najczęściej na podstawie wartości maksymalnej wybranej harmonicznej lub poprzez dopasowanie sygnałów symulacyjnych do sygnałów pomiarowych. Pierwsze podejście cechuje się krótkim czasem wyznaczania stężenia, ale wymaga wcześniejszego skalowania analizatora i wykazuje ograniczoną odporność na zmiany temperatury i ciśnienia. Z kolei metody bazujące na iteracyjnym dopasowaniu sygnałów pozwalają ograniczyć część tych problemów, jednak odbywa się to kosztem znacznie dłuższego czasu obliczeń. W związku z tym doktorant **słusznie zidentyfikował ograniczenia dotychczasowych metod jako podstawę do poszukiwania nowego rozwiązania.**

Z zawartej w rozprawie analizy literatury wyraźnie wynika, że istnieje potrzeba opracowania metod umożliwiających szybkie i dokładne wyznaczanie stężenia gazu techniką WMS przy jednoczesnym ograniczeniu wpływu zmian jego temperatury i ciśnienia. Doktorant wskazał, że szansą na rozwiązanie tego problemu jest wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych, których niewątpliwą zaletą jest zdolność do aproksymacji złożonych i nieliniowych zależności oraz krótki czas odpowiedzi wytrenowanego modelu. Należy zaznaczyć, że recenzowana rozprawa powstała w zespole posiadającym znaczący dorobek w zakresie optoelektronicznej detekcji gazów i laserowej spektroskopii absorpcyjnej. Prace badawcze rozwijane od lat w Wojskowej Akademii Technicznej przez zespół związany

m.in. z prof. Zbigniewem Bieleckim i dr. hab. inż. Jackiem Wojtasem, promotorem rozprawy, obejmują szereg innowacyjnych układów detekcyjnych przeznaczonych do monitorowania środowiska, diagnostyki medycznej oraz systemów bezpieczeństwa. Rozprawa Filipa Musiałka dobrze wpisuje się w ten wieloletni kierunek badań, jednocześnie rozszerzając go o zastosowanie nowoczesnych metod uczenia maszynowego i sztucznych sieci neuronowych do interpretacji sygnałów uzyskiwanych w technice WMS. Swoje badania doktorant prowadził na przykładzie metanu, którego detekcja ma istotne znaczenie m.in. w ochronie środowiska, bezpieczeństwie, energetyce oraz diagnostyce medycznej. Warto również zauważyć, że zaproponowane podejście może zostać po odpowiednim dostosowaniu zastosowane również w analizatorach innych gazów.

W mojej opinii **tematykę rozprawy należy uznać za aktualną i bardzo dobrze wpisującą się w rozwój dyscypliny** Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Szczególnie wartościowe jest połączenie techniki spektroskopowej z nowoczesnymi metodami uczenia maszynowego, przy czym ich zastosowanie jest podporządkowane rozwiązaniu konkretnego problemu metrologicznego. Na pozytywną ocenę zasługuje również kompleksowe podejście doktoranta do podjętego zagadnienia, obejmujące analizę teoretyczną, opracowanie metod przetwarzania danych oraz ich weryfikację w laboratoryjnym analizatorze gazu. Podjęty problem badawczy ma oryginalny charakter i istotne znaczenie zarówno dla dalszego rozwoju techniki WMS, jak i jej praktycznych zastosowań.

2. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska kpt. mgra inż. Filipa Musiałka ma formę klasycznej monografii i liczy 148 stron. Praca została podzielona na siedem zasadniczych rozdziałów, poprzedzonych wykazem skrótów i oznaczeń, a zakończonych bibliografią oraz załącznikami. Przyjęta struktura pracy jest logiczna i odpowiada kolejnym etapom realizacji problemu badawczego, tj. od przedstawienia podstaw fizycznych i analizy aktualnego stanu wiedzy, przez zaprojektowanie i charakteryzację laboratoryjnego analizatora WMS, opracowanie modeli sztucznych sieci neuronowych, aż do ich implementacji oraz eksperymentalnej weryfikacji.

Pierwszy rozdział stanowi wprowadzenie do problematyki laserowej spektroskopii absorpcyjnej oraz przedstawia motywację do podjęcia badań. Doktorant wskazuje liczne obszary zastosowania analizatorów gazu oraz na przykładzie metanu pokazuje, że w praktycznych zastosowaniach wymagane są zarówno duża dokładność pomiaru, jak i krótki czas odpowiedzi oraz odporność na zmiany parametrów badanego gazu.

Rozdział drugi zawiera obszerny przegląd aktualnego stanu wiedzy. Doktorant omówił w nim podstawy spektroskopii TLAS i WMS, zasady generowania i demodulacji harmoniczných, a następnie przeprowadził analizę głównych metod stosowanych do wyznaczania stężenia gazu. Istotną część tego rozdziału stanowi przegląd dotychczasowych zastosowań uczenia maszynowego i sztucznych sieci neuronowych w technice WMS. Analiza ta prowadzi do **wskazania luki badawczej** związanej z brakiem rozwiązania umożliwiającego jednocześnie szybkie wyznaczanie stężenia oraz ograniczenie wpływu zmian temperatury

i ciśnienia gazu. Rozdział ten stanowi bardzo dobre przygotowanie do części badawczej rozprawy, ponieważ doktorant zestawiał możliwości sztucznych sieci neuronowych z ograniczeniami klasycznych metod stosowanych w spektroskopii WMS, dobrze uzasadniając wybór narzędzi wykorzystanych w dalszej części pracy.

W rozdziale trzecim doktorant zawarł cel i tezę pracy, a także przedstawił zaplanowane zadania naukowo-badawcze obejmujące analizę techniki WMS, zaprojektowanie i uruchomienie analizatora laboratoryjnego, opracowanie dedykowanych sieci neuronowych oraz ich eksperymentalną weryfikację. Przyjęty plan badawczy należy ocenić bardzo pozytywnie. Zakres prac był szeroki i bardzo dobrze odpowiadał postawionemu problemowi badawczemu.

Rozdział czwarty poświęcono laboratoryjnemu analizatorowi gazu typu WMS. Doktorant szczegółowo przedstawił jego konstrukcję oraz parametry poszczególnych elementów układu. Istotną częścią tego rozdziału jest również eksperymentalna ocena układów działających w technice DAS i WMS oraz analiza wpływu temperatury i ciśnienia gazu na niepewność wyznaczania jego stężenia. W mojej opinii **jest to bardzo wartościowa część rozprawy**, ponieważ pokazuje, że dalsze prace związane ze sztucznymi sieciami neuronowymi zostały poprzedzone szczegółową analizą rzeczywistego toru pomiarowego.

Piąty rozdział dotyczy opracowania modeli sztucznych sieci neuronowych. Doktorant przedstawił sposób utworzenia zbiorów danych oraz dwa podstawowe modele nazwane WMS-A oraz WMS-B. Model WMS-A wykorzystuje informacje o maksymalnej wartości sygnału $R_{2f/1f}$, temperaturze oraz ciśnieniu gazu, natomiast model WMS-B wyznacza stężenie wyłącznie na podstawie 512 próbek sygnału $R_{2f/1f}$. W przypadku modelu WMS-B przeanalizowano różne struktury sieci, w tym perceptrony, sieci konwolucyjne, rekurencyjne i transformery, a najlepsze wyniki uzyskano dla głębokiej sieci konwolucyjnej. Ważnym elementem prac było również opracowanie autoenkodera służącego do redukcji szumu w sygnałach wejściowych. Decyzja o jego zastosowaniu pokazuje, że doktorant w trakcie realizacji pracy reagował na rzeczywiste problemy pojawiające się podczas badań, nie ograniczając się do realizacji z góry przyjętego schematu.

Rozdział szósty zawiera eksperymentalną weryfikację analizatora z zaimplementowanymi modelami sztucznych sieci neuronowych. Omówiono w nim wyniki badań poprawności, precyzji oraz odporności wskazań na zmiany temperatury i ciśnienia. Wyniki badań potwierdziły dobrą zgodność wskazań z wartościami referencyjnymi oraz powtarzalność obu modeli. Co szczególnie istotne z punktu widzenia tezy rozprawy, przeprowadzono także eksperymenty dla różnych temperatur i ciśnień, w których w szerokim zakresie zmian tych wielkości odchylenia wskazań modeli WMS-A oraz WMS-B nie przekraczały 5% wartości referencyjnej. Warto podkreślić, że **zakres przeprowadzonych badań eksperymentalnych został dobrze dobrany do weryfikacji przyjętej tezy pracy**.

Ostatni rozdział pracy zawiera syntetyczne podsumowanie uzyskanych rezultatów oraz wskazanie głównych osiągnięć doktoranta.

Bibliografia obejmuje 163 pozycje, w tym zarówno klasyczne prace stanowiące podstawę spektroskopii i sztucznych sieci neuronowych, jak i bardzo aktualne publikacje.

Aż 71 pozycji, czyli około 44% całej bibliografii, pochodzi z lat 2020 - 2025. Świadczy to o dobrym rozpoznaniu przez doktoranta zarówno podstaw teoretycznych, jak i współczesnych kierunków badań w tej tematyce.

Jeżeli chodzi o stronę redakcyjną, rozprawa została przygotowana bardzo starannie, a liczne rysunki, schematy i zestawienia tabelaryczne są czytelne i konsekwentnie opracowane. Występujące pojedyncze literówki oraz drobne niekonsekwencje w zapisie jednostek i symboli mają wyłącznie charakter redakcyjny i nie wpływają na wysoką ocenę merytoryczną pracy.

3. Ocena osiągnięć zawartych w rozprawie

Za najważniejsze osiągnięcie pracy uważam opracowanie oraz eksperymentalne zweryfikowanie metody umożliwiającej szybkie wyznaczanie stężenia gazu w analizatorze WMS przy jednoczesnym ograniczeniu wpływu zmian temperatury i ciśnienia gazu. W klasycznych metodach dopasowania sygnałów czas wyznaczania parametrów może wynosić od kilkudziesięciu do nawet kilkuset sekund, natomiast w opracowanych przez doktoranta modelach **czas wyznaczania stężenia nie przekraczał 50 ms**. Różnica ta ma istotne znaczenie nie tylko z punktu widzenia obliczeniowego, ale również praktycznego, ponieważ umożliwia zastosowanie analizatora w pomiarach dynamicznych.

Drugim ważnym osiągnięciem kpt. mgra inż. Filipa Musiałka jest **opracowanie dwóch modeli o odmiennych założeniach użytkowych**. Model WMS-A, zapewniający mniejszy błąd wyznaczania stężenia, wykorzystuje dodatkową informację o temperaturze i ciśnieniu gazu, natomiast model WMS-B bazuje wyłącznie na sygnale $R_{2f/1f}$. Takie zróżnicowanie modeli należy ocenić pozytywnie, ponieważ zwiększa możliwości ich praktycznego zastosowania. W układach, w których możliwy jest niezależny pomiar temperatury i ciśnienia, korzystniejsze jest zastosowanie modelu WMS-A, natomiast model WMS-B może być szczególnie interesujący w konfiguracjach, w których bezpośredni pomiar tych parametrów jest utrudniony.

Na podkreślenie zasługuje również **sposób przygotowania zbiorów danych**. Wykorzystanie modeli fizycznych i charakterystyk rzeczywistego analizatora do generowania danych umożliwiło ograniczenie konieczności przygotowywania bardzo dużej liczby eksperymentalnych mieszanin referencyjnych, a jednocześnie pozwoliło objąć szeroki zakres kombinacji stężenia, temperatury i ciśnienia gazu. Istotnym elementem było także zastosowanie autoenkodera do redukcji szumu oraz poprawy zdolności generalizacji modeli. Pokazuje to, że doktorant nie ograniczył się do realizacji z góry przyjętego schematu, lecz w trakcie badań reagował na rzeczywiste problemy pojawiające się podczas implementacji opracowanych rozwiązań.

Bardzo wartościowym elementem pracy jest **eksperymentalna weryfikacja modeli**. Samo uzyskanie dobrych parametrów dla danych treningowych lub walidacyjnych nie stanowiłoby wystarczającego dowodu ich przydatności w technice pomiarowej. Doktorant przeprowadził natomiast testy dla rzeczywistych próbek gazowych i wykazał, że dla modelu WMS-A wartość średniego bezwzględnego błędu procentowego MAPE wynosi około 2,6%, natomiast dla modelu WMS-B około 5,6%. Otrzymane wyniki należy uznać za bardzo dobre, szczególnie biorąc pod uwagę jednoczesne skrócenie czasu obliczeń oraz odporność modeli

na zmiany temperatury i ciśnienia. Bardzo dobrze oceniam również badania modeli przeprowadzone w warunkach szybkich zmian stężenia gazu. Wykazały one, że opracowane rozwiązanie może być stosowane nie tylko dla próbek o ustalonym stężeniu, ale również w warunkach dynamicznych zmian składu badanego gazu. Stanowi to istotne potwierdzenie praktycznej użyteczności zaproponowanej metody.

Na uwagę zasługuje także fakt, że część wyników bezpośrednio związanych z rozprawą **została już opublikowana w czasopismach z bazy JCR**, przypisanych do dyscypliny AEEiTK. Praca z 2024 roku ukazała się w czasopiśmie *Sensors* (IF = 4,0; 100 pkt według wykazu ministerialnego), natomiast w 2025 roku opublikowano artykuły w *Engineering Applications of Artificial Intelligence* (IF = 9,0; 140 pkt) oraz w *Przeglądzie Elektrotechnicznym* (IF = 0,4; 70 pkt). We wszystkich trzech publikacjach doktorant jest pierwszym autorem. Szczególnie warto podkreślić, że dwie pierwsze z wymienionych prac, pomimo krótkiego czasu od publikacji, uzyskały już odpowiednio 9 i 11 cytowań według bazy WoS, co należy uznać za bardzo dobry rezultat i potwierdzenie zainteresowania uzyskanymi wynikami.

W mojej opinii przedstawione w rozprawie rezultaty pozwalają jednoznacznie stwierdzić, że **cel pracy został osiągnięty, a postawiona teza została potwierdzona** zarówno na podstawie badań symulacyjnych, jak i eksperymentalnych. Szeroki zakres wykonanych prac, ich spójność oraz umiejętne połączenie analiz teoretycznych, modelowania i badań eksperymentalnych świadczą o bardzo dobrym przygotowaniu doktoranta do samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Przedstawione osiągnięcia mają oryginalny charakter i stanowią istotny wkład w rozwój metod wyznaczania stężenia gazów z wykorzystaniem techniki WMS i narzędzi sztucznej inteligencji.

4. Pytania wynikające z lektury rozprawy

Recenzowana rozprawa została przygotowana na bardzo wysokim poziomie merytorycznym, a przedstawiony materiał badawczy jest obszerny, spójny i dobrze udokumentowany. Poniższe pytania nie wynikają z istotnych zastrzeżeń do pracy, lecz z zainteresowania przedstawioną tematyką oraz możliwościami dalszego rozwoju zaproponowanych rozwiązań. Proszę doktoranta o ustosunkowanie się do następujących kwestii:

Pytanie 1. Jakie są, zdaniem doktoranta, najważniejsze czynniki ograniczające zdolność generalizacji opracowanych modeli podczas przejścia od danych symulacyjnych do sygnałów eksperymentalnych?

W rozprawie bardzo dobrze pokazano, że nawet przy dużej zgodności sygnałów symulacyjnych i eksperymentalnych działanie sieci neuronowej może ulec pogorszeniu, a jednym ze sposobów przeciwdziałania temu zjawisku było zastosowanie autoenkodera do redukcji szumu. Warto byłoby poznać opinię doktoranta, czy dalszą poprawę generalizacji należałoby wiązać przede wszystkim z dokładniejszym odwzorowaniem rzeczywistych właściwości analizatora w modelu symulacyjnym, lepszym przygotowaniem danych treningowych czy też z rozwojem samej architektury sieci neuronowej.

Pytanie 2. Jak wyglądałby proces adaptacji opracowanej metody do pomiaru stężenia innego gazu niż metan?

Rozprawa została zweryfikowana eksperymentalnie dla metanu, jednak przyjęta koncepcja ma potencjalnie szerszy charakter. Zasadne jest wskazanie, które elementy można byłoby zachować bez zmian, a które wymagałyby ponownego dobrania lub opracowania. Tego rodzaju komentarz pozwoliłby lepiej określić zakres uniwersalności zaproponowanego podejścia.

Pytanie 3. Jakie zastosowania praktyczne doktorant uważa za najbardziej odpowiednie dla modelu WMS-A, a jakie dla modelu WMS-B?

Oba modele mają odmienne założenia użytkowe. Warto byłoby określić, w jakich rzeczywistych zastosowaniach przewaga każdego z tych modeli byłaby największa oraz jakie kryteria uznałby za najważniejsze przy wyborze jednego z nich.

Pytanie 4. Jak doktorant ocenia możliwości dalszego zwiększenia autonomii i miniaturyzacji opracowanego analizatora?

Uzyskany czas wyznaczania stężenia poniżej 50 ms wskazuje na duży potencjał rozwiązania do pracy w warunkach wymagających szybkiej odpowiedzi układu pomiarowego. Cenne byłoby odniesienie się do możliwości przeniesienia modeli na bardziej kompaktowe platformy obliczeniowe oraz opracowania autonomicznego analizatora przeznaczonego do pracy poza laboratorium, np. w systemach monitoringu środowiskowego lub bezpieczeństwa.

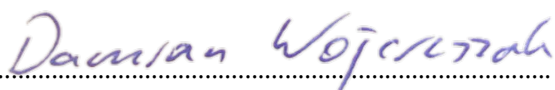
5. Wniosek końcowy

Podsumowując, stwierdzam, że rozprawa doktorska kpt. mgra inż. Filipa Musiałka pt. „Wyznaczanie stężenia gazu w układach laserowej spektroskopii absorpcyjnej z modulacją długości fali za pomocą metody z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych” **spełnia wymagania** określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. W szczególności rozprawa potwierdza wysoki poziom wiedzy teoretycznej doktoranta w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne oraz jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a jej przedmiot stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Przedstawione w rozprawie wyniki badań potwierdzają osiągnięcie założonego celu oraz słuszność postawionej tezy. Na szczególnie wysoką ocenę zasługują szeroki i bardzo dobrze zaplanowany zakres prac, umiejętne połączenie zagadnień z zakresu spektroskopii laserowej, techniki pomiarowej, cyfrowego przetwarzania sygnałów i sztucznej inteligencji, a także kompleksowa eksperymentalna weryfikacja opracowanych modeli w rzeczywistym analizatorze WMS. Istotną wartością pracy jest również praktyczny charakter uzyskanych rezultatów, w tym znaczne skrócenie czasu wyznaczania stężenia gazu przy jednoczesnym ograniczeniu wpływu zmian temperatury i ciśnienia. W związku z tym **wnioskuję o dopuszczenie do publicznej obrony rozprawy doktorskiej** kpt. mgra inż. Filipa Musiałka.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę wysoki poziom naukowy rozprawy, jej oryginalność, szeroki zakres przeprowadzonych badań oraz wartość uzyskanych rezultatów, **rekomenduję** Radzie Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Wojskowej Akademii Technicznej **wyróżnienie rozprawy doktorskiej**

kpt. mgra inż. Filipa Musiałka. Za takim wnioskiem przemawia również opublikowanie części najważniejszych wyników badań w wysoko ocenianych czasopismach z bazy JCR oraz zauważalne, pomimo krótkiego czasu od ich publikacji, zainteresowanie tymi wynikami ze strony środowiska naukowego. Opracowane rozwiązania stwarzają także możliwość budowy szybkich i autonomicznych analizatorów gazów, odpornych na zmiany warunków pomiarowych. Mają one istotny potencjał wdrożeniowy nie tylko w zastosowaniach przemysłowych i gospodarczych, ale również w układach detekcyjnych przeznaczonych dla systemów bezpieczeństwa i obronności.


.....
(podpis recenzenta)