

Wrocław, 14.01.2025

dr hab. inż. Michał Mazur, prof. uczelni
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wrocławska
50-372 Wrocław
ul. Janiszewskiego 11/17

S E K R E T A R I A T
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 27.01.2025

Zarejestrowano pod nr 510.10.7/25

Podpis dm

Recenzja rozprawy doktorskiej

pt. **"Uczenie maszynowe w systemach elektronicznego nosa: estymacja parametrów metabolicznych i detekcja chorób"**

(ang. **„Machine Learning in Electronic Nose Systems: Estimation of Matabolic Parameters and Disease Detection”**)

autorstwa mgr inż. **Anny Paleczek**,

której promotorem jest Prof. dr hab. inż. Artur Rydosz (Akademia Górniczo-Hutnicza),
opracowana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika,
Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej z dnia 7.11.2025 r.

Podstawa opracowania recenzji

Recenzja została wykonana w odpowiedzi na pismo (RD AEEiTK/510.10.3/25) z dnia 7.11.2025 r. otrzymana od Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej Pana dra hab. inż. Ryszarda Srokę, prof. AGH, w odniesieniu do odpowiednich wymagań określonych w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2024, poz.1571 z póź. zm.) oraz na podstawie rekomendacji Rady Doskonałości Naukowej zawartych w poradniku pt. „Recenzje w postępowaniu o awans naukowy” z 2022 r.

Tematyka i charakterystyka rozprawy

Tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Paleczek dotyczy wykorzystania algorytmów uczenia maszynowego w systemie nosa elektronicznego do wykrywania chorób związanych z zaburzeniami metabolicznymi. Punkt wyjścia stanowi założenie, że skład chemiczny wydychanego powietrza, reprezentowany przez profil lotnych związków organicznych, może stanowić źródło informacji diagnostycznej, a odpowiednio dobrany układ czujników gazów w połączeniu z metodami analizy danych pozwala na wydobycie tych zależności w sposób obiektywny, prawidłowy i powtarzalny. Dlatego też praca wpisuje się w nurt rozwoju nieinwazyjnych metod diagnostyki przesiewowej, łącząc zagadnienia z obszaru sensorów gazów, przetwarzania sygnałów oraz uczenia maszynowego.

Rozprawa ma charakter wyraźnie interdyscyplinarny i koncentruje się na praktycznych aspektach budowy oraz weryfikacji podejścia badawczego prowadzonego dwutorowo, tj. w dwóch wzajemnie dopełniających się obszarach: (i) kontrolowane eksperymenty laboratoryjne z użyciem modelowych, sztucznie stworzonych mieszanek gazowych, umożliwiające ocenę odpowiedzi układu pomiarowego i weryfikację przyjętych metod analizy, oraz (ii) badania kliniczne próbek wydychanego powietrza pozyskanych od pacjentów, stanowiące podstawę do oceny przydatności diagnostycznej proponowanych rozwiązań. W tym kontekście kluczową rolę odgrywa dobór i ocena algorytmów uczenia maszynowego (m.in. w zadaniach klasyfikacji i predykcji wybranych parametrów metabolicznych), a także krytyczna analiza ograniczeń wynikających z charakteru danych pomiarowych, zróżnicowania wśród badanych pacjentów oraz warunków akwizycji próbek.

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Anny Paleczek została napisana w formie serii artykułów naukowych i skupia się na zastosowaniu algorytmów uczenia maszynowego do

analizy danych z elektronicznego nosa w kontekście wykrywania chorób metabolicznych. Na samym początku dość nieśmiało wybrzmiał cel pracy, którym było opracowanie i weryfikacja podejścia łączącego badania laboratoryjne modelowych mieszanek gazowych z analizą próbek wydychanego powietrza od pacjentów z użyciem elektronicznego nosa i zastosowaniem algorytmów uczenia maszynowego.

Doktorantka w swojej pracy doktorskiej sformułowała w rozdziale wstępnym (rozdział 1 – *Wprowadzenie*) także hipotezę badawczą, która brzmi:

„System nosa elektronicznego, wspierany przez dedykowane algorytmy uczenia maszynowego, może skutecznie przewidywać wybrane parametry metaboliczne i klasyfikować próbki zgodnie ze stanem zdrowia pacjenta”.

Biorąc pod uwagę aktualny stan wiedzy, z całą pewnością można stwierdzić, że zaproponowana w pracy tematyka jest ważna i aktualna. Stawiana hipoteza, pomimo swojej dużej ogólności, wydaje się trafna, a jej potwierdzenie może przynieść korzyści poprzez rozwój systemów diagnostyki przesiewowej różnego rodzaju chorób z wykorzystaniem elektronicznego nosa i algorytmów uczenia maszynowego.

Rozprawa doktorska została opracowana w języku angielskim. Składa się ona z 5 rozdziałów, w których Doktorantka przedstawiła: wprowadzenie do tematyki analizy wydychanego powietrza za pomocą elektronicznego nosa, przegląd algorytmów uczenia maszynowego do detekcji chorób w wydychanym powietrzu z użyciem nosa elektronicznego (rozdział 2), wyniki eksperymentalne otrzymane podczas badań laboratoryjnych (rozdział 3) oraz klinicznych (rozdział 4), a także podsumowania i wniosków. Rozdział 3 i 4 to jedynie krótki opis wyników badań zawartych w odpowiednich artykułach. Rozprawa zawiera ponadto streszczenia w języku polskim i angielskim, spis akronimów i skrótów, listę rysunków, spis literatury, informacje o dokonaniach i dorobku naukowym Doktorantki.

W przeglądzie literatury (rozdział 2) Doktorantka przedstawiła metody analizy wydychanego powietrza w diagnostyce chorób, ze szczególnym uwzględnieniem roli systemów nosa elektronicznego (e-nose) i algorytmów uczenia maszynowego. Jest to jeden z najobszerniejszych rozdziałów rozprawy – zawiera najpierw ogólne wprowadzenie do metod uczenia maszynowego wykorzystywanych w detekcji chorób na podstawie próbek wydychanego powietrza, a następnie przegląd jednostek chorobowych możliwych do identyfikacji tym podejściem, m.in. schorzeń nowotworowych, chorób układu oddechowego oraz przewlekłych chorób nerek. Rozdział kończy krótkie omówienie wykorzystania testów oddechowych w diagnostyce klinicznej. Przegląd literaturowy składa się z ponad 70 źródeł, spośród których zdecydowana większość została opublikowana w ciągu ostatnich 10 lat. Pokazuje to, że wybrana tematyka badawcza recenzowanej rozprawy doktorskiej bardzo dobrze wpisuje się w aktualny nurt badań naukowych związanych z wykorzystaniem uczenia maszynowego w systemach nosa elektronicznego. Ta część rozprawy doktorskiej opiera się na dwóch publikacjach naukowych: artykule przeglądowym (AP1, czasopismo *Journal of Breath Research*) poświęconym algorytmom uczenia maszynowego stosowanym w wykrywaniu cukrzycy oraz rozdziale w książce (AP2, wydawnictwo Elsevier) dotyczącym zastosowań elektronicznych nosów i uczenia maszynowego w medycynie.

Rozdział 3 przedstawia wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzonych na specjalnie przygotowanych mieszaninach gazów. Obejmują one m.in. analizę możliwości wykrywania acetonu oraz klasyfikacji próbek przy użyciu systemu nosa elektronicznego i metod uczenia maszynowego. Treść rozdziału oparto na trzech publikacjach naukowych: dwóch artykułach w czasopiśmie z listy *Journal Citation Reports* (czasopisma *Sensors* (AP3) oraz *Sensors and Actuators B: Chemical* (AP4)) oraz jednym artykule konferencyjnym (AP5). Publikacje te dotyczą w szczególności detekcji acetonu jako potencjalnego biomarkera cukrzycy, predykcji jego stężenia w obecności etanolu (jako czynnika zakłócającego) oraz klasyfikacji próbek odpowiadających różnym stadiom cukrzycy.

Rozdział 4 przedstawia wyniki badań klinicznych przeprowadzonych na grupie 151 osób, w których oceniano możliwość predykcji wybranych parametrów metabolicznych – stężeń cholesterolu, glukozy oraz kwasu moczowego – na podstawie analizy próbek wydychanego powietrza z wykorzystaniem systemu nosa elektronicznego i algorytmów uczenia maszynowego. Rozdział oparto na dwóch publikacjach naukowych: artykule w czasopiśmie *ACS Sensors* (AP6) poświęconym przewidywaniu stężenia cholesterolu oraz artykule konferencyjnym (AP7), w którym rozszerzono analizę o predykcję stężeń glukozy i kwasu moczowego.

Najważniejsza część recenzowanej pracy to **cykl publikacji w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne**. W jego skład wchodzi:

- cztery prace opublikowane w wiodących czasopismach z listy Journal Citation Reports:
 1. **A. Paleczek**, A. Rydosz (2022), *Review of the algorithms used in exhaled breath analysis for the detection of diabetes*, *Journal of Breath Research* 16(2) 026003, DOI:10.1088/1752-7163/AC4916 – **praca AP1**
 - IF w roku opublikowania: 3,8, liczba punktów wg. wykazu MNiSW: 100, liczba cytowań bez autocytowań wg. bazy Scopus (na dzień 8.01.2026): 31
 2. **A. Paleczek**, D. Grochala, A. Rydosz (2021), *Artificial breath classification using XGBoost algorithm for diabetes detection*, *Sensors* 21(12) 4187, DOI:10.3390/s21124187 – **praca AP3**
 - IF w roku opublikowania: 3,847, liczba punktów wg. wykazu MNiSW: 100, liczba cytowań bez autocytowań wg. bazy Scopus (na dzień 8.01.2026): 62
 3. **A. Paleczek**, A. Rydosz (2024), *The effect of high ethanol concentration on E-nose response for diabetes detection in exhaled breath: Laboratory studies*, *Sensors and Actuators B: Chemical* 408 135550, DOI:10.1016/J.SNB.2024.135550 – **praca AP4**
 - IF w roku opublikowania: 7,7, liczba punktów wg. wykazu MNiSW: 200, liczba cytowań bez autocytowań wg. bazy Scopus (na dzień 8.01.2026): 18
 4. **A. Paleczek**, J. Grochala, D. Grochala, J. Słowik, M. Pihut, J.E. Loster, A. Rydosz (2024), *Noninvasive Total Cholesterol Level Measurement Using an E-Nose System and Machine Learning on Exhaled Breath Samples*, *ACS Sensors* 9(12) 6630-6637, DOI:10.1021/ACSSENSORS.4C02198 – **praca AP6**
 - IF w roku opublikowania: 7,7, liczba punktów wg. wykazu MNiSW: 140, liczba cytowań bez autocytowań wg. bazy Scopus (na dzień 8.01.2026): 4
- jeden rozdział w książce wydanej przez wydawnictwo Elsevier:
 1. **A. Paleczek**, Recent achievements of exhaled breath analysis at the research stage - Artificial intelligence and machine learning algorithms, *Exhaled Breath Analysis*, 325–355, 2025, DOI:10.1016/B978-0-443-33796-3.00005-2 – **praca AP2**
- dwie publikacje w materiałach konferencyjnych:
 1. **A. Paleczek**, D. Grochala, and A. Rydosz, *Prediction of diabetes state using artificial breath and e-nose system supported by machine learning*, 8th International Conference on Bio-Sensing Technology, 12-15.05.2024, Sewilla, Hiszpania – **praca AP5**
 2. **A. Paleczek**, J. Grochala, D. Grochala, J. Słowik, M. Pihut, J.E. Loster, A. Rydosz, *Revolutionizing Health Monitoring: A Three-Gas Sensor System Powered by Machine Learning for Predicting Cholesterol, Glucose, and Uric Acid Levels from Exhaled Breath*, 47th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology, 14-17.07.2025, Kopenhaga, Dania – **praca AP7**

Wśród wymienionych publikacji warto zauważyć, że Pani mgr inż. Anna Paleczek jest jedyną autorką rozdziału w książce szeroko omawiającego przegląd literatury na temat użycia algorytmów uczenia maszynowego w analizie wydychanego powietrza. Z kolei dwa inne artykuły z listy filadelfijskiej są dwuautorskie, a pozostałe są pracami wieloautorskimi. Warto zauważyć, że w każdej z podanych prac Doktorantka jest pierwszym autorem, co wskazuje na

jej bardzo istotny wkład w powstanie tych publikacji. Wszystkie prace zostały opublikowane w latach 2021-2025, a liczba ich cytowań wynosi 115 (bez autocytowań, baza Scopus, stan na dzień 8.01.2026 r.), co jest doskonałym wynikiem. Łączna liczba punktów za prace z listy filadelfijskiej wg. wykazu MNiSW to 540. Każdy z artykułów został krótko scharakteryzowany, tj. w preambułach do rozdziałów 2, 3 i 4 Doktorantka przedstawiła ogólne informacje o każdym z nich. Natomiast to, czego zabrakło mi w całej pracy to opis swojego oryginalnego i indywidualnego wkładu w powstanie każdej pracy wieloautorskiej, do czego wrócę w dalszej części recenzji.

Artykuł AP1 ma charakter przeglądowy i dotyczy algorytmów wykorzystywanych w analizie wydychanego powietrza w kierunku wykrywania cukrzycy. Autorzy porządkują zagadnienia związane z biomarkerami (ze szczególnym uwzględnieniem acetonu) oraz przedstawiają typowe systemy akwizycji danych stosowane w badaniach oddechu (zarówno podejścia oparte o analizę instrumentalną, jak i macierze czujników i układy nosa elektronicznego). Następnie omawiają kluczowe etapy wstępnego przetwarzania danych (m.in. normalizacja/filtracja) oraz zestawiają najczęściej stosowane metody analizy i uczenia maszynowego w zadaniach klasyfikacji i regresji (np. PCA oraz klasyczne modele ML, a także sieci neuronowe). W artykule wskazano również istotne ograniczenia praktyczne, takie jak zmienność danych, wpływ warunków pomiaru, czy brak standaryzacji procedur, które determinują wiarygodność i możliwość klinicznego zastosowania takich metod.

Publikacja AP2 (jednoautorska) ma również charakter rozdziału przeglądowego i koncentruje się na kompletnym sposobie przetwarzania danych pozyskiwanych podczas pomiarów próbek wydychanego powietrza z wykorzystaniem systemów nosa elektronicznego zaczynając od etapu rejestracji sygnałów wieloczujnikowych po opracowanie przenośnego urządzenia do detekcji różnych chorób. W pracy omówiono kluczowe elementy tej procedury, tj. metody wstępnego przetwarzania danych, selekcji oraz inżynierii cech w celu budowy możliwie najlepszych modeli predykcyjnych, podkreślając na przykładach literaturowych wpływ tych etapów na skuteczność klasyfikacji czy regresji. Autorka przedstawia również najczęściej stosowane algorytmy sztucznej inteligencji, kryteria ich doboru i zależność efektywności od rodzaju danych i jednostki chorobowej. Omawia również podejścia z obszaru *explainable AI* istotne z punktu widzenia diagnostyki medycznej. Dodatkowo zaprezentowano przykłady systemów nosa elektronicznego proponowanych przez różne zespoły badawcze, umożliwiających diagnostykę wspieraną algorytmami AI w czasie rzeczywistym.

Z kolei artykuł AP3 przedstawia opracowanie i weryfikację systemu klasyfikacji „oddechu” pod kątem wykrywania cukrzycy z wykorzystaniem macierzy czujników gazów w elektronicznym nosie oraz algorytmu XGBoost. W pracy przeprowadzono symulacje próbek wydychanego powietrza z acetonem jako biomarkerem cukrzycy (z uwzględnieniem domieszek innych gazów i zmiennej wilgotności), a następnie zaproponowano kompletny proces obejmujący wstępne przetwarzanie sygnałów (m.in. kompensację dryftu linii bazowej), wybór cech oraz strojenie hiperparametrów metodą siatki (grid search) z weryfikacją krzyżową. Uzyskane wyniki wykazały bardzo wysoką skuteczność klasyfikacji, a porównanie z klasycznymi klasyfikatorami (SVM, KNN, Decision Trees, Random Forest) wskazało przewagę XGBoost, szczególnie w zakresie czułości istotnej dla testów przesiewowych. Dodatkowo przedstawiono analizę istotności sensorów oraz dyskusję ograniczeń rozwiązania, np. brak weryfikacji na rzeczywistych próbkach od pacjentów i czas odpowiedzi sensorów.

Artykuł AP4 przedstawia laboratoryjne badania wpływu wysokich stężeń etanolu na odpowiedź układu elektronicznego nosa przeznaczonego do detekcji cukrzycy na podstawie wydychanego powietrza. Autorzy przygotowali syntetyczne mieszaniny gazów, a następnie przeprowadzili analizę możliwości predykcji stężenia acetonu (jako biomarkera powiązanego z cukrzycą) przy użyciu różnych zestawów czujników (aceton/etanol/CO₂/RH) oraz algorytmów uczenia maszynowego (m.in. XGBoost, CatBoost, LGBM, RF). Wykazano, że

etanol istotnie zaburza detekcję acetonu i dlatego powinien być mierzony i uwzględniany w modelu. W typowym zakresie acetonu spotykanym w oddechu diabetyków uzyskano MAE = 0,245 ppm (algorytm XGBoost, zestaw 4 czujników), natomiast w scenariuszach z wysokim stężeniem etanolu najlepsze wyniki osiągnął CatBoost (MAE = 0,568 ppm). Na podstawie analizy istotności cech oraz przeprowadzonych badań porównawczych zaproponowano optymalizację liczby czujników, wskazując, że w rozważanym zastosowaniu trzy czujniki powinny być wystarczające. Zaproponowano także koncepcję wielostopniowego działania urządzenia, w tym detekcja alkoholu, dobór właściwego modelu oraz ostrzeżenie o możliwej niewiarygodności pomiaru.

Artykuł AP5 jest krótką publikacją konferencyjną. Przedstawia koncepcję klasyfikacji stanu metabolicznego (zdrowy, stan przedcukrzycowy, cukrzyca) na podstawie „sztucznego oddechu” (syntetycznych mieszanin gazów) mierzonego przy użyciu systemu nosa elektronicznego wspieranego algorytmami uczenia maszynowego. Autorzy przygotowali mieszaniny gazowe odwzorowujące oddech (m.in. z udziałem acetonu jako kluczowego składnika), zarejestrowali odpowiedzi zestawu czujników (w tym czujników wrażliwych na aceton/etanol, czujników CO₂ oraz wilgotności), a następnie zbudowali modele klasyfikacyjne, wskazując CatBoost jako metodę dającą najlepsze wyniki w porównaniu m.in. z RF, DT i XGBoost. W pracy zaprezentowano wyniki klasyfikacji wraz z macierzą pomyłek oraz analizę istotności cech/czujników, z której wynika, że największy wpływ na klasyfikację ma czujnik odpowiadający za detekcję acetonu, natomiast wilgotność ma znaczenie pomocnicze. Autorzy podkreślają, że jest to etap wstępny i kolejnym krokiem powinna być weryfikacja podejścia na rzeczywistych próbkach od pacjentów.

Artykuł AP6 przedstawia według autorów pierwszy system nosa elektronicznego sprzężony z algorytmami uczenia maszynowego do nieinwazyjnej estymacji stężenia cholesterolu całkowitego na podstawie analizy próbek wydychanego powietrza. Badania przeprowadzono na grupie 151 osób, dla których wykonano pomiary elektronicznym nosem (macierz czujników gazów, m.in. czujniki dla VOC/acetonu/etanolu, NO₂/H₂S, CO₂ oraz wilgotności), a wartości referencyjne cholesterolu oznaczono z krwi. W części modelowej porównano szereg metod regresyjnych, wskazując LGBMRegressor jako najlepsze rozwiązanie dla którego uzyskano MAPE 13,7% dla całego zakresu pomiarowego oraz MAPE 8% dla zakresu normy (≤ 200 mg/dL). Autorzy omawiają również ograniczenia (m.in. liczebność i rozkład próby, metoda referencyjna oparta o test paskowy) oraz wskazują kierunki dalszych prac, w tym rozwój urządzenia przenośnego i rozszerzenie analiz o frakcje HDL/LDL.

Artykuł AP7 ma formę krótkiego doniesienia konferencyjnego (jednostronicowego) i stanowi rozwinięcie oraz rozszerzenie badań przedstawionych w pracy AP6. W publikacji zaprezentowano koncepcję trójczujnikowego systemu nosa elektronicznego, wspieranego algorytmami uczenia maszynowego, przeznaczonego do predykcji stężenia cholesterolu całkowitego, a ponadto glukozy i kwasu moczowego na podstawie analizy wydychanego powietrza. Badania przeprowadzono na tej samej grupie klinicznej 151 osób, a najlepsze rezultaty uzyskano ponownie z wykorzystaniem modelu LGBMRegressor, gdzie otrzymano następujące błędy predykcji: MAE = 31,33 mg/dL (MAPE = 19,74%) dla cholesterolu całkowitego, MAE = 19,32 mg/dL (MAPE = 15,58%) dla glukozy oraz MAE = 1,43 mg/dL (MAPE = 26,56%) dla kwasu moczowego. Ze względu na skrótową formę artykuł pełni przede wszystkim rolę prezentacji idei oraz wyników wstępnych, wskazując możliwość redukcji liczby czujników i rozszerzenia podejścia na kilka parametrów metabolicznych jednocześnie.

Czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora w określonej dyscyplinie albo dyscyplinach?

Tak - rozprawa doktorska mgr inż. Anny Paleczek prezentuje jej ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne (AEEiTK), w

szczegółności w obszarze sensorów gazów i systemów nosa elektronicznego, a także w obszarze metod analizy danych pomiarowych. W części przeglądowej Autorka wykazuje znajomość podstaw i ograniczeń analizy wydychanego powietrza w diagnostyce, roli biomarkerów oraz czynników wpływających na wiarygodność pomiarów (np. warunki akwizycji, zmienność próbek, zakłócenia). Świadczy to o zrozumieniu teoretycznych podstaw metrologii i analizy sygnałów w układach wieloczuJNIKOWYCH, które są niezbędne do właściwego projektowania i interpretacji badań z użyciem nosów elektronicznych. Jednocześnie rozprawa potwierdza, że Doktorantka dysponuje solidnym przygotowaniem teoretycznym w zakresie uczenia maszynowego stosowanego do danych otrzymywanych z sensorów – obejmującym dobór modeli do zadań regresji i klasyfikacji, inżynierię cech, weryfikację i ocenę jakości modeli oraz krytyczną interpretację wyników. Autorka świadomie wykorzystuje i porównuje różne klasy algorytmów (od metod klasycznych po modele zespołowe), uwzględniając specyfikę danych nosa elektronicznego (wielowymiarowość, dryft, wpływ czynników zakłócających), a także omawia ograniczenia wynikające z charakteru badań laboratoryjnych i klinicznych. W efekcie można stwierdzić, że rozprawa dokumentuje nie tylko biegłość praktyczną w stosowaniu narzędzi ML, ale również rozumienie ich podstaw teoretycznych i zasad poprawnej weryfikacji w kontekście nauk technicznych.

Czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej przez osobę ubiegającą się o nadanie stopnia doktora?

Tak - rozprawa doktorska mgr inż. Anny Paleczek wykazuje jej umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, zarówno na etapie planowania i realizacji badań, jak i opracowania oraz interpretacji wyników. Autorka potrafi sformułować problem badawczy i hipotezę, zaprojektować metodykę obejmującą badania laboratoryjne na modelowych mieszaninach gazowych oraz badania kliniczne na próbkach wydychanego powietrza, a następnie przeprowadzić analizę danych z wykorzystaniem odpowiednio dobranych metod uczenia maszynowego. Widoczna jest również umiejętność krytycznego odnoszenia się do ograniczeń badań, formułowania wniosków oraz wskazywania kierunków dalszych prac. Na samodzielność naukową Doktorantki wskazuje także fakt, że zasadnicze wyniki zostały upowszechnione w formie cyklu publikacji o zasięgu międzynarodowym, w tym w czasopiśmie wysokiej rangi, a dodatkowo w pracach tych Autorka występuje jako pierwszy lub samodzielny autor. Rozprawa pokazuje biegłość w doborze i weryfikacji modeli, umiejętność porównywania podejść, a także konsekwencję w rozwijaniu jednego, spójnego wątku badawczego od badań wstępnych po zastosowania kliniczne. Niezależnie od formalnego udziału wkładu w publikacjach wieloautorskich, całość cyklu wskazuje na dojrzałość badawczą i kompetencje pozwalające na samodzielne prowadzenie prac naukowych w obszarze systemów nosa elektronicznego i analizy danych.

Czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne?

Doktorantka wskazała, że jej głównym wkładem w rozwój dyscypliny naukowej było opracowanie, zaimplementowanie oraz zweryfikowanie podejścia łączącego pomiary z wykorzystaniem nosa elektronicznego z dedykowanymi algorytmami uczenia maszynowego w celu predykcji wybranych parametrów metabolicznych oraz klasyfikacji próbek wydychanego powietrza zgodnie ze stanem zdrowia pacjenta. Rola Doktorantki nie ograniczała się wyłącznie do implementacji modeli uczenia maszynowego, lecz obejmowała również istotny udział w przygotowaniu koncepcji badań, doborze metodyki eksperymentalnej (zarówno w części laboratoryjnej, jak i klinicznej), opracowaniu procedur przetwarzania danych i weryfikacji modeli oraz krytycznej interpretacji uzyskanych rezultatów. Wynika z tego, że Doktorantka

opanowała zarówno zagadnienia związane z akwizycją i analizą danych z czujników gazów, jak i aspekty metodyczne uczenia maszynowego oraz ocenę jakości predykcji i klasyfikacji. Przedstawiony cykl prac zawiera wyniki badań o charakterze oryginalnym, opublikowane w czasopiśmie i materiałach konferencyjnych o zasięgu międzynarodowym, co należy uznać za znaczący wkład w rozwój metod nieinwazyjnej diagnostyki przesiewowej opartej na analizie wydychanego powietrza i narządziach uczenia maszynowego.

Doktorantka podsumowuje swoje osiągnięcia naukowe odnosząc się do odpowiednich publikacji podanych w spisie, tj.:

- Projektowanie i testowanie systemu nosa elektronicznego zdolnego do analizowania odpowiednio przygotowanych mieszanek gazowych i próbek klinicznych – publikacje nr AP3, AP4, AP5;
- Opracowanie protokołów eksperymentalnych w oparciu o przegląd literatury, symulujących różne stężenia biomarkerów i obecność dodatkowych czynników wpływających na ich wykrywanie (np. etanol) – artykuły AP3, AP4, AP5;
- Wybór i testowanie wielu algorytmów uczenia maszynowego, zarówno do klasyfikacji chorób, jak i do przewidywania stężeń biomarkerów – publikacje AP3, AP4, AP5;
- Skuteczna klasyfikacja sztucznie wykonanych próbek oddechu do trzech grup (osoby zdrowe, osoby ze stanem przedcukrzycowym, osoby z cukrzycą) w warunkach laboratoryjnych – publikacja AP5;
- Przewidywanie stężeń acetonu z uwzględnieniem czynników zakłócających obecnych w mieszaninach gazowych, co umożliwiło ilościowe przewidywanie biomarkerów – publikacja AP4;
- Przeprowadzenie badania na grupie 151 pacjentów, co pozwoliło na pierwszą ocenę skuteczności metody w warunkach klinicznych – publikacja AP6;
- Wykorzystanie danych z systemu nosa elektronicznego i algorytmów uczenia maszynowego do przewidywania stężenia cholesterolu, glukozy i kwasu moczowego na podstawie próbek oddechu – publikacja AP7.

W opinii recenzenta wyniki badań i analiz przedstawione przez mgr inż. Annę Paleczek w rozprawie doktorskiej pt. *Uczenie maszynowe w systemach elektronicznego nosa: estymacja parametrów metabolicznych i detekcja chorób* pozwalają jednoznacznie stwierdzić, że hipoteza badawcza została potwierdzona, a cel rozprawy – polegający na opracowaniu i weryfikacji podejścia łączącego badania laboratoryjne modelowych mieszanek gazowych z analizą próbek wydychanego powietrza pacjentów z wykorzystaniem nosa elektronicznego oraz algorytmów uczenia maszynowego – został osiągnięty. Cykl publikacji naukowych obejmujący cztery artykuły w czasopiśmie z listy *Journal Citation Reports*, rozdział w książce oraz dwa artykuły konferencyjne stanowi spójne i oryginalne opracowanie naukowe dotyczące zastosowania algorytmów uczenia maszynowego do analizy danych z nosa elektronicznego w kontekście estymacji parametrów metabolicznych oraz nieinwazyjnej detekcji wybranych zaburzeń/chorób na podstawie analizy wydychanego powietrza.

Doktorantka przedstawiła także swoje osiągnięcia naukowe, które według mnie zasługują na szczególną uwagę. Wśród nich wyróżnić można opublikowanie 10 artykułów naukowych w czasopiśmie z listy JCR (na dzień dzisiejszy 12) oraz kilku rozdziałów w książkach i publikacji konferencyjnych, które na dzień 8.01.2026 r. cytowane były już 181 razy (bez autocytowań, indeks Hirscha 6, źródło: Scopus). Dodatkowo, po złożeniu pracy doktorskiej do recenzji ukazały się kolejne publikacje w znanych i bardzo dobrych czasopiśmie jak *Sensors and Actuators B*, czy *Scientific Reports z Nature Portfolio*, które dotyczą czujników gazów i w których Doktorantka ma wiodącą rolę. Wyniki swoich prac aktywnie prezentowała na 2 międzynarodowych konferencjach naukowych i brała również udział w realizacji 6 projektów naukowych. Warto zauważyć, że Doktorantka w grudniu 2025 roku otrzymała projekt Preludium z Narodowego Centrum Nauki pt. „Smart Breath: Platforma e-nos wspierana przez

AI do wykrywania i monitorowania zespołu metabolicznego na podstawie lotnych biomarkerów”, co świadczy o dużej istotności jej pracy naukowej i doskonałym dorobku naukowym na tym etapie kariery.

Uwagi szczegółowe i ogólne

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska została przygotowana starannie od strony redakcyjnej i merytorycznej. Jednak w trakcie jej analizy pojawiło się kilka pytań i wątpliwości, na które recenzent chciałby zwrócić uwagę.

1. Cel rozprawy mógłby zostać bardziej nakreślony w części wprowadzającej (np. w rozdziale 1). Natomiast jeśli chodzi o hipotezę badawczą, to została ona sformułowana w sposób dość ogólny, co z jednej strony nadaje jej uniwersalny charakter, a z drugiej jednak utrudnia jednoznaczne wskazanie przyjętych kryteriów jej weryfikacji. W mojej opinii korzystne byłoby dodatkowe podkreślenie celu pracy oraz doprecyzowanie hipotezy przez wskazanie mierzalnych założeń, takich jak rodzaj analizowanych danych, charakter zadań (predykcja/klasyfikacja) oraz przyjęty poziom weryfikacji.
2. Wkład Doktorantki w publikacje wchodzące w skład cyklu - rozprawa ma formę cyklu publikacji, przy czym część prac jest wieloautorska. Pomimo zastosowania w publikacjach tzw. „deklaracji ról” (taksonomii) typu CRediT, na podstawie samej treści artykułów trudne jest określenie jej indywidualnego wkładu w przygotowanie koncepcji badań, realizację eksperymentów, analizę danych oraz opracowanie wyników. W związku z powyższym proszę, aby Doktorantka w zestawieniu szczegółowo wskazała swój oryginalny wkład.
3. Zwracam uwagę, że publikacja AP3 w czasopiśmie *Sensors* została opublikowana w dniu 18 czerwca 2021 r. Najprawdopodobniej stanowiła ona podstawę wyboru tematyki rozprawy przez Doktorantkę na etapie rekrutacji do Szkoły Doktorskiej. Publikacja ta może obejmować znacznie szerszy zakres badań niż było to przedmiotem pracy magisterskiej, więc jej ujęcie w cyklu publikacji było zasadne. W związku z powyższym proszę o doprecyzowanie relacji pomiędzy artykułem AP3 a pracą magisterską, tj. czy przedstawione w AP3 wyniki stanowią rozwinięcie badań zrealizowanych w ramach pracy magisterskiej, czy też zostały wykonane już w ramach planu badawczego doktoratu.
4. Publikacja AP7 ma formę jednostronicowego doniesienia konferencyjnego. W związku z tym proszę o doprecyzowanie, czy wyniki w niej zaprezentowane zostały następnie rozwinięte w kolejnych pracach badawczych lub przełożyły się na implementację rozwiązania (np. w postaci prototypu/urządzenia lub procedury) o potencjale praktycznego zastosowania. Dodatkowo, po uzupełnieniu danych bibliograficznych tego artykułu można stwierdzić, że konferencja na której przedstawiono wyniki z tej publikacji, jest punktowana i ujęta w wykazie MNiSW, co stanowi wartość dodaną dla oceny dorobku Doktorantki, jednak w rozprawie informacja ta nie została jednoznacznie wskazana.
5. Czy badania kliniczne planowane są również dla acetonu jako biomarkera cukrzycy – w rozdziale 3 przedstawiono wyniki dla specjalnie przygotowanych mieszanin gazowych w warunkach laboratoryjnych, natomiast weryfikacja kliniczna, podobnie jak w przypadku cholesterolu, byłaby naturalnym i bardzo wartościowym rozwinięciem dotychczasowych prac.
6. W artykule AP5 (komunikat konferencyjny) Autorzy podkreślają, że przedstawione wyniki mają charakter wstępny, a kolejnym krokiem powinna być weryfikacja zaproponowanego podejścia na rzeczywistych próbkach wydychanego powietrza od pacjentów. W związku z tym proszę o informację, czy takie badania zostały już przeprowadzone i jakie były ich ewentualne rezultaty.

7. W artykule AP2 opisane są sposoby odejmowania tła pomiarowego – który jest według Doktorantki najlepszy? Jak jest to implementowane podczas trwania rzeczywistego pomiaru?
8. Biorąc pod uwagę duże doświadczenie Doktorantki w doborze i ocenie wielu algorytmów uczenia maszynowego, zasadne wydaje się pytanie, czy rozważała podjęcia się modyfikacji istniejących metod bądź opracowania dedykowanego podejścia (np. hybrydowego) lepiej dostosowanego do specyfiki danych z nosa elektronicznego (dryft, zakłócenia, zmienność warunków pomiaru).
9. W rozprawie zasadniczy nacisk położono na analizę danych i warstwę algorytmiczną, natomiast opis samej konstrukcji systemu nosa elektronicznego oraz stanowiska pomiarowego ma charakter ograniczony. W związku z tym proszę Doktorantkę o uzupełniające informacje dotyczące: (i) architektury nosa elektronicznego, (ii) zastosowanego oprogramowania i procedury akwizycji danych, a także (iii) sposobu przygotowania i kontroli warunków pomiaru. Dodatkowo proszę o wskazanie, czy przedstawione rozwiązanie jest objęte zgłoszeniem patentowym bądź inną formą ochrony własności intelektualnej.
10. W kontekście zastosowania nosa elektronicznego do analizy wydychanego powietrza pojawia się istotna kwestia czasowa: odpowiedź wielu czujników gazów stabilizuje się w skali kilku/kilkunastu minut, podczas gdy pojedynczy wydech pacjenta trwa zwykle kilkanaście sekund. Stąd nasuwa się pytanie, w jaki sposób realizowano akwizycję próbek w badaniach opisanych w rozprawie oraz czy w procedurze stosowano stałą kontrolę warunków poboru próbki przez określony czas.
11. W sekcji *List of papers* występują drobne braki edytorskie. W opisach publikacji raz podawana jest pełna lista autorów, a w innych przypadkach stosowane jest sformułowanie „et al.” („i inni”). Dodatkowo w przypadku publikacji konferencyjnych AP5 oraz AP7 nie podano informacji o konferencjach (nazwa, miejsce, rok / tom materiałów). Dla pozycji AP5 podano błędny tytuł pracy.
12. W podrozdziale 5.3 (*Przyszłe prace i perspektywy*) Doktorantka wskazała potencjalne kierunki dalszych badań. Zasadne byłoby wskazanie podczas obrony rozprawy, czy któryś z tych kierunków został już podjęty lub częściowo zrealizowany.

W niektórych przedstawionych artykułach w ramach cyklu publikacji znajdują się drobne literówki lub mało istotne nieścisłości. Dla przykładu w publikacji AP2 opublikowanej jako rozdział w książce we wzorze 7.4 brakuje omówienia zmiennej X (w opisie jest x). W artykule AP1 można znaleźć zdanie: „*The air in the human lungs is composed of death that has a volume of approximately 150 ml and approximately 350 ml of alveolar volume [7, 96].*” Prawdopodobnie zamiast “death” Autorka miała na myśli „*dead space*” lub „*dead space volume*”. Również w tym artykule znajduje się sformułowanie (strona 5): „*... the detection of diabetes were are shown in table 4*” lub (strona 6): „*... coupled to an mass mpectrometer (MS) system....*”. W rozdziale 3 (strona 74 oraz 76) podano złą numerację prac – powinny być prace AP3, AP4 oraz AP5.

Wymienione uwagi nie wpływają na wysoką ocenę oryginalności dorobku Doktorantki ani na ocenę jej wkładu w rozwój metod detekcji związków chemicznych z wykorzystaniem systemów nosa elektronicznego wspieranych algorytmami uczenia maszynowego. Proszę jednak Doktorantkę o krótkie odniesienie się do najistotniejszych z nich podczas publicznej obrony rozprawy.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawione przez Doktorantkę prace doświadczalne oraz wyniki badań i analizy pokazują, że założony w rozprawie cel został zrealizowany, a hipoteza potwierdzona. Stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu

naukowego, a Pani mgr inż. Anna Paleczek udowodniła tym samym wysoki poziom swojej wiedzy w zakresie dyscypliny AEEiTK, w której ubiega się o nadanie stopnia doktora.

Podsumowując, stwierdzam, że recenzowana praca z nadmiarem spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w oparciu o art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 - Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. 2024, poz.1571 z póź. zm.) i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę fakt opublikowania swoich wyników badań w bardzo prestiżowych czasopismach z listy Journal Citation Reports oraz publikacji rozdziału monografii w książce wydanej przez wydawnictwo Elsevier, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej. Pani mgr inż. Anna Paleczek spełnia z nadmiarem kryteria zawarte w regulaminie „Kryteriów wyróżniania rozpraw doktorskich w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie”, który został dostarczony wraz z pismem przewodnim Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej AEEiTK Akademii Górniczo-Hutniczej. Dokładniej mówiąc, spośród 7 publikacji przedstawionych jako cykl, jedna została opublikowana w czasopiśmie z listy JCR punktowanym za 200 pkt, jedna w czasopiśmie punktowanym za 140 pkt oraz dwie w czasopismach punktowanych za 100 pkt, a także jedna publikacja jako rozdział w książce wydanej przez wydawnictwo Elsevier. Warto również wspomnieć, że prace składające się na cykl publikacji były już cytowane 115 razy (stan na dzień 8.01.2026 r.), co świadczy o zainteresowaniu badaniami naukowymi prowadzonymi przez Autorkę. Mając powyższe na uwadze, a także wysoką wartość merytoryczną przedstawionych badań oraz ich istotny potencjał aplikacyjny, w szczególności w zakresie nieinwazyjnego monitorowania parametrów metabolicznych i wczesnej diagnostyki przesiewowej, **rekomenduję Radzie Dyscypliny AEEiTK Akademii Górniczo-Hutniczej wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Paleczek.**

Michał Morum