

dr hab. inż. Dariusz Janusek
E: dariusz.janusek@gmail.com
M: +48601812556

Wpłynęło dnia 22.12.2025 Warszawa, 15.12.2025
Zarejestrowano pod nr 510.105/25
Podpis dm

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Paleczek pt. „*Machine Learning in Electronic Nose Systems: Estimation of Metabolic Parameters and Disease Detection*” (pol. „*Uczenie maszynowe w systemach elektronicznego nosa: estymacja parametrów metabolicznych i detekcja chorób*”), której promotorem jest Pan prof. dr hab. inż. Artur Rydosz.

Podstawa prawna

Recenzję wykonałem w odpowiedzi na pismo z dnia 7 listopada 2025 przesłane przez Przewodniczącą Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne w Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie Pana prof. dr. hab. inż. Ryszarda Sroka (L.dz. RD AEEiTK/5.10.10.4/35) w odniesieniu do wymagań sformułowanych w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 z późn. zmianami oraz wymagań szczegółowych przekazanych w umowie o wykonanie recenzji rozprawy doktorskiej.

Stopień doktora powinien zostać nadany w dziedzinie nauki: inżynierijno-technicznych, w dyscyplinie: Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

Charakterystyka ogólna pracy

Recenzowana rozprawa doktorska pt. „*Machine Learning in Electronic Nose Systems: Estimation of Metabolic Parameters and Disease Detection*” dotyczy zastosowania metod uczenia maszynowego w systemach elektronicznego nosa do nieinwazyjnej analizy wydychanego powietrza, ze szczególnym uwzględnieniem estymacji parametrów metabolicznych oraz detekcji chorób metabolicznych, w tym cukrzycy. Tematyka pracy wpisuje się w nowoczesne nurty badań na styku inżynierii biomedycznej, elektroniki, automatyki i sztucznej inteligencji, odpowiadając jednocześnie na istotne potrzeby współczesnej diagnostyki medycznej.

Celem rozprawy było opracowanie i walidacja systemu e-nosa wspieranego algorytmami uczenia maszynowego, zdolnego do analizy złożonych sygnałów z matrycy sensorów gazowych oraz predykcji parametrów metabolicznych i klasyfikacji stanu zdrowia pacjentów. Doktorantka wykazała, że odpowiednio zaprojektowany system umożliwia skuteczną i wiarygodną ocenę wybranych wskaźników metabolicznych na podstawie analizy wydychanego powietrza.

Praca ma formę spójnego cyklu publikacji naukowych obejmujących zarówno artykuły przeglądowe, jak i badania oryginalne. Badania laboratoryjne przeprowadzono na sztucznych mieszaninach gazowych, a wstępne badania kliniczne – na grupie 151 osób. W części przeglądowej przedstawiono aktualny stan wiedzy o analizie wydychanego powietrza w diagnostyce chorób, ze szczególnym uwzględnieniem uczenia maszynowego, omówiono biomarkery, ograniczenia sensorów oraz wyzwania związane z wielowymiarowością danych i czynnikami środowiskowymi.

Część badawcza obejmuje projektowanie i testowanie systemu e-nosa do analizy sztucznego wydechu oraz oceny jego skuteczności w detekcji cukrzycy i przewidywaniu stężenia acetonu. Analiza wpływu etanolu jako czynnika zakłócającego podnosi wartość praktyczną wyników. W badaniach klinicznych oceniono możliwość predykcji parametrów biochemicznych, takich jak glukoza,

cholesterol całkowity i kwas moczowy, potwierdzając skuteczność systemu i jego potencjał w nieinwazyjnym monitorowaniu stanu zdrowia pacjentów.

Praca cechuje się wysokim poziomem merytorycznym, poprawnością metodologiczną oraz spójnością koncepcyjną. Umiejętnie łączy wiedzę z zakresu elektroniki, analizy sygnałów, uczenia maszynowego i nauk medycznych, a uzyskane rezultaty mają zarówno wartość poznawczą, jak i praktyczną, wskazując na realny potencjał opracowania nieinwazyjnych narzędzi diagnostycznych.

Podsumowując, rozprawa stanowi istotny wkład w rozwój metod analizy wydychanego powietrza z wykorzystaniem systemów e-nosa i algorytmów uczenia maszynowego, a jakość przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników pozwala wysoko ocenić przedstawioną pracę.

Jaki jest problem naukowy (teza) rozprawy i czy został on trafnie i jasno sformułowany?

Postawiony przez Doktorantkę problem naukowy został jasno sformułowany i dotyczy opracowania oraz walidacji aparatu matematycznego do oceny stężeń lotnych związków organicznych zawartych w wydychanym powietrzu. Analiza obejmuje zarówno sztucznie wytworzone gazy, jak i próbki powietrza wydychanego przez osoby zdrowe oraz pacjentów z zaburzeniami metabolicznymi. Doktorantka sformułowała tezę badawczą, zgodnie z którą system e-nosa, wspierany dedykowanymi algorytmami uczenia maszynowego, może skutecznie przewidywać wybrane parametry metaboliczne oraz klasyfikować próbki w zależności od stanu zdrowia pacjenta. Problem naukowy rozprawy jest klarownie określony i dotyczy jednego z kluczowych wyzwań związanych z tworzeniem e-nosa, mianowicie odpowiedniego i optymalnego doboru czujników gazów z punktu widzenia zakresu dostarczanej informacji, a także zastosowania adekwatnego aparatu matematycznego umożliwiającego wiarygodne wnioskowanie o zawartości określonych składników gazowych. Ze względu na wielowymiarowość danych oraz złożoność składu wydychanego powietrza, w analizie sygnałów z czujników gazów Doktorantka trafnie zastosowała algorytmy uczenia maszynowego, których zadaniem jest zarówno detekcja chorób, jak i predykcja parametrów zdrowotnych.

Czy autorka rozwiązała podstawiony problem i czy użył do tego właściwych metod dowodząc, że posiadał umiejętności związane z metodyką i metodologią prowadzenia badań naukowych?

Głównym celem prowadzonych badań było opracowanie i walidacja systemu opartego na technologii e-nosa, umożliwiającego wiarygodną detekcję biomarkerów w wydychanym powietrzu w celu nieinwazyjnej diagnostyki oraz monitorowania zdrowia metabolicznego pacjentów. Prace badawcze rozpoczęto od wnikliwej analizy literatury dotyczącej stanu techniki w zakresie wykorzystania analizy wydychanego powietrza w diagnostyce chorób.

Badania początkowo koncentrowały się na detekcji pojedynczego biomarkera, a następnie analizowano wpływ różnych interferencji na działanie e-nosa oraz skuteczność algorytmów uczenia maszynowego w ich kompensacji. Ostatecznie system przetestowano w zadaniu klasyfikacji wieloklasowej. Wyniki wskazują, że opracowany system może zostać rozwinięty w praktyczne narzędzie diagnostyczne.

Doktorantka wykazała się interdyscyplinarną wiedzą z zakresu elektroniki, metod pomiarowych, systemów przetwarzania sygnałów, inżynierii biomedycznej oraz medycyny. Proces badawczy prowadzony był w sposób systematyczny i obejmował m.in. definicję oraz analizę problemu i możliwych rozwiązań, wybór optymalnej strategii badawczej zgodnie z przyjętymi kryteriami, a następnie przeprowadzenie badań laboratoryjnych i klinicznych prototypu urządzenia.

Zastosowane metody okazały się właściwe do rozwiązania postawionego problemu naukowego, a Doktorantka wykazała się umiejętnością stosowania metodologii badań naukowych. Na podstawie



wyników przedstawionych w rozprawie oraz w publikacjach można stwierdzić, że postawiona hipoteza badawcza została potwierdzona.

Czy tematyka rozprawy jest aktualna lub dostatecznie ważna?

Liczba badań prowadzonych w zakresie analizy wydychanego powietrza oraz wykorzystania technologii e-nosa w diagnostyce chorób metabolicznych rośnie dynamicznie w ostatnich latach, co świadczy o rosnącym zainteresowaniu środowiska naukowego tym obszarem. Temat jest również bardzo aktywny w zakresie ochrony własności intelektualnej. Przeszukanie bazy WIPO pod kątem frazy „e-nose” wskazuje na **12 800 wyników** w PATENTSCOPE, co potwierdza innowacyjność i potencjał wdrożeniowy opracowywanego rozwiązania. Firmy technologiczne prowadzą aktywne działania w zakresie ochrony IP — np. **Ainos, Inc. posiada 123 aktywne patenty** związane z AI-nose i cyfrowym węchem (stan na wrzesień 2025).

Badania rynkowe wskazują również na duży potencjał komercyjny rozwijanego zagadnienia. Szacuje się, że **rynek e-nosów w latach 2024–2025 będzie wart około 30 miliardów dolarów**, a do 2032 r. ma osiągnąć wartość **70–80 miliardów dolarów**. Wzrost ten będzie napędzany przez diagnostykę medyczną (np. analizę oddechu pod kątem wykrywania chorób) oraz bezpieczeństwo żywności. W opiece zdrowotnej obserwuje się wysoki średnioroczny wskaźnik wzrostu (CAGR) rzędu **13–14%**, wynikający m.in. z wykorzystania sztucznej inteligencji do nieinwazyjnej diagnostyki chorób.

Dokładna liczba startupów działających w obszarze e-nosów jest trudna do określenia, niemniej najnowsze analizy rynku wskazują na ponad **111 aktywnych startupów i scaleupów**. Wśród nich wyróżniają się:

- **Aryballe Technologies SAS (Francja):** cyfrowa detekcja zapachu, w tym rozwiązania dla osób z anosmią.
- **Owlstone Medical Ltd. (Wielka Brytania):** analiza oddechu w diagnostyce chorób.
- **Smart Nanotubes Technologies GmbH (Niemcy):** wielokanałowe, energooszczędne układy scalone do detekcji gazów.
- **Smelldect (Niemcy):** przenośne urządzenia do pomiaru zapachu dla użytku prywatnego i komercyjnego.
- **The eNose Company (Holandia):** technologie analizy wydychanego powietrza do zastosowań medycznych.
- **PES Technologies (Wielka Brytania):** elektroniczny nos do oceny stanu gleby w rolnictwie.
- **MUI Robotics Co., Ltd. (Tajlandia):** spin-off uniwersytecki rozwijający e-nosy dla przemysłu spożywczego.

Rynek elektronicznych nosów charakteryzuje się wysokim stopniem innowacyjności, a rozwój startupów jest wspierany przez kilka kluczowych trendów:

- **Sztuczna inteligencja i uczenie maszynowe:** coraz częstsze wykorzystanie algorytmów do interpretacji złożonych danych zapachowych i tworzenia „odcisków palców zapachowych”.
- **Miniaturyzacja i przenośność:** rozwój kompaktowych, przenośnych i ręcznych urządzeń dla użytku konsumenckiego i terenowego.
- **Zastosowania specjalistyczne:** szybki wzrost w ocenie jakości żywności, monitorowaniu środowiska i diagnostyce medycznej.

- **Nowe technologie czujników:** wykorzystanie czujników grafenowych, nanomateriałów i zaawansowanych matryc czujników w celu poprawy czułości i wydajności.

Podsumowując, przedstawione dane jasno wskazują, że tematyka rozprawy jest aktualna i istotna zarówno z naukowego, jak i rynkowego punktu widzenia.

Na czym polega oryginalny dorobek autorki i jakie jest jego znaczenie poznawcze lub przydatność praktyczna dla nauki bądź techniki?

Oryginalny dorobek autora polega przede wszystkim na opracowaniu i przetestowaniu systemu e-nose wspieranego algorytmami uczenia maszynowego do analizy wydychanego powietrza w kontekście wykrywania chorób metabolicznych. Doktorantka wprowadziła nowe podejście do klasyfikacji próbek powietrza i ilościowego przewidywania stężenia biomarkerów, takich jak aceton, cholesterol, glukoza czy kwas moczowy, uwzględniając jednocześnie wpływ czynników zakłócających, np. obecność etanolu. Ważnym elementem dorobku jest także opracowanie protokołów eksperymentalnych oraz przeprowadzenie wstępnej walidacji klinicznej na grupie 151 uczestników, co stanowi pierwszy krok w praktycznym zastosowaniu systemu w diagnostyce nieinwazyjnej.

Znaczenie poznawcze pracy polega na pogłębieniu wiedzy o możliwości wykorzystania sensorów gazowych i uczenia maszynowego do monitorowania stanu metabolicznego pacjentów, w tym w klasyfikacji stanu zdrowia i przewidywaniu stężeń biomarkerów. Z praktycznego punktu widzenia, opracowany system stanowi nowoczesne narzędzie diagnostyczne, umożliwiające nieinwazyjny i szybki monitoring parametrów metabolicznych, co może wspierać wczesne wykrywanie chorób, takie jak cukrzyca czy zaburzenia lipidowe, oraz ułatwiać monitorowanie zdrowia pacjentów w codziennej praktyce klinicznej.

Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy autora, wiedzy na zaawansowanym poziomie, o charakterze podstawowym dla dziedziny nauk technicznych oraz o charakterze szczegółowym, odpowiadającej obszarowi prowadzonych badań naukowych?

Analizując treść rozprawy, można stwierdzić, że Doktorantka wykazuje wysoką wiedzę na poziomie zaawansowanym w dziedzinie nauk technicznych odpowiadającym obszarowi prowadzonych badań. Doktorantka dobrze rozumie technologię sensorów gazowych, systemy e-nose oraz ich zastosowania w diagnostyce medycznej, a także podstawy chemii sensorycznej, przetwarzania sygnałów i algorytmów uczenia maszynowego. Rozprawa pokazuje jej zdolność do projektowania i testowania systemu e-nose, doboru sensorów, opracowywania protokołów eksperymentalnych oraz stosowania różnych algorytmów uczenia maszynowego do klasyfikacji stanu zdrowia i przewidywania stężenia biomarkerów. Przeprowadzone badania laboratoryjne i wstępna walidacja kliniczna wymagają wiedzy interdyscyplinarnej, obejmującej aspekty techniczne, chemiczne i medyczne. Doktorantka potrafi projektować eksperymenty badawcze, analizować dane i interpretować wyniki, co świadczy o jej samodzielności i dojrzałości naukowej. Rozprawa potwierdza, że posiada ona zarówno wiedzę ogólną, niezbędną w naukach technicznych, jak i szczegółową, umożliwiającą prowadzenie badań naukowych w analizowanym obszarze.

Czy rozprawa obejmuje najnowsze osiągnięcia nauki i świadczy o znajomości współczesnej literatury z dyscypliny naukowej, której dotyczy?

Rozprawa doktorska obejmuje aktualne osiągnięcia nauki i jednoznacznie świadczy o bardzo dobrej znajomości współczesnej literatury z dyscypliny, której dotyczy. Przedstawione w niej zagadnienia zostały osadzone w szerokim i aktualnym kontekście badawczym, obejmującym nowoczesne metody analizy wydychanego powietrza, zastosowanie elektronicznych nosów oraz zaawansowanych algorytmów uczenia maszynowego w diagnostyce medycznej. Doktorantka wykazuje dogłębną orientację zarówno w klasycznych podstawach analizy biomarkerów oddechowych, jak i w

najnowszych kierunkach rozwoju tej dziedziny, w tym w zagadnieniach związanych z przetwarzaniem danych wielowymiarowych, kompensacją zakłóceń oraz interpretowalnością modeli uczenia maszynowego.

Analiza literatury została przeprowadzona w sposób krytyczny i uporządkowany, a cytowane prace obejmują zarówno kluczowe publikacje przeglądowe, jak i aktualne artykuły badawcze dotyczące zastosowań e-nosów w diagnostyce chorób metabolicznych, metod referencyjnych analizy gazów oraz algorytmów klasyfikacji i regresji wykorzystywanych w medycynie. Doktorantka nie ogranicza się do prostego przytoczenia wyników innych badaczy, lecz odnosi je do własnych badań, wskazując ich znaczenie, ograniczenia oraz możliwości dalszego rozwoju. Świadczy to o dojrzałym podejściu naukowym i umiejętności syntetycznego ujęcia stanu wiedzy.

Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że rozprawa uwzględnia najnowsze trendy badawcze, takie jak przejście od badań laboratoryjnych do walidacji klinicznej, wykorzystanie algorytmów typu XGBoost, CatBoost i LGBM, a także rosnącą rolę metod Explainable AI w zastosowaniach medycznych. Odwołania do aktualnych problemów badawczych, takich jak standaryzacja pobierania próbek oddechu, wpływ czynników zakłócających czy potrzeba porównań z technikami referencyjnymi, potwierdzają znajomość bieżących doniesień w literaturze światowej.

Podsumowując, rozprawa w pełni spełnia kryterium znajomości współczesnej literatury naukowej i uwzględniania najnowszych osiągnięć w danej dyscyplinie. Zakres przywoływanego źródła, sposób ich analizy oraz umiejętne powiązanie z własnymi badaniami dowodzą, że Doktorantka posiada ugruntowaną i aktualną wiedzę teoretyczną, a przedstawiona praca stanowi wartościowy wkład w rozwój badań nad nieinwazyjną diagnostyką opartą na analizie wydychanego powietrza.

Jakie są wady i słabe strony rozprawy?

Każda praca badawcza musi być w pewnym momencie zakończona mimo, że badania mogłyby być kontynuowane. Odpowiednia analiza oraz wyciągnięcie wniosków z uzyskanych wyników daje możliwość ich wykorzystania w praktyce oraz pozwala na rozwój nauki w wybranej dziedzinie badawczej. Ponieważ zrealizowana praca badawcza jest kompletna moje pytania dotyczą potencjalnie następnym krokom w rozwoju technologii wykorzystującego uzyskane wyniki badań i powinny być traktowane jako głos w dyskusji na temat dalszych badań i możliwości wykorzystania praktycznego opracowanych przez Doktorantkę metod pomiarowych i analitycznych.

Uwagi wymagające komentarza lub uzupełnienia:

1. Jaka jest wrażliwość poszczególnych etapów przetwarzania sygnału na niedoskonałość danych pomiarowych: np. niespójność sygnałów pomiarowych, zakłócenia wewnętrzne i zewnętrzne, małą selektywność czujników? Czy identyfikuje Pani szczególne miejsca w procesie przetwarzania sygnału, które mogą wymagać ulepszenia w przyszłości?
2. Czy widzi Pani możliwość miniaturyzacji części obliczeniowej tak, aby bez uszczerbku na wiarygodności mogła być implementowana w urządzeniach przenośnych.
3. Proszę rozważyć możliwość zastąpienia obecnego pipeline'u e-Nose jednym deterministycznym lub nieliniowym modelem funkcjonalnym (surrogate model / sensor-level functional replacement), który mapowałby sygnały czujników bezpośrednio na wyjście systemu, zachowując dokładność klasyfikacji lub regresji przy ograniczonych zasobach sprzętowych i umożliwiając implementację w systemach wearable. Z Pani doświadczenia, czy taka koncepcja jest praktycznie wykonalna, w jakich warunkach miałaby sens i czy możliwa byłaby implementacja w systemach embedded, np. na FPGA lub w smartwatchu?
4. Proszę o opinię: czy sondy wprowadzane przez kanał roboczy bronchoskopu do aspiracji lokalnego powietrza (daje próbki bliższe źródłu niż „oddech z ust” – dolne drogi oddechowe) i badania VOC mają uzasadnienie w stosowaniu? Czy widzi pani wartość kliniczna takiego



badania uzasadniająca stosowanie metod inwazyjnych? Czy może mogłaby to być metoda referencyjna walidacji e-nosa?

5. Czy widzi Pani możliwość miniaturyzacji i ciągłego monitorowania VOC np. poprzez urządzenia wszczepialne?

Podsumowanie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska zawiera ciekawe i ważne dla rozwoju dyscypliny wyniki o dużym potencjale wdrożeniowym.

Rozprawa doktorska zasługuje na wyróżnienie. Doktorantka jest głównym autorem pięciu artykułów dotyczących bezpośrednio badań opisanych w rozprawie doktorskiej oraz 3 artykułów opisujących inne badania. Dodatkowo jest współautorem pięciu innych artykułów oraz dwunastu doniesień konferencyjnych. Była członkiem zespołu badawczego w sześciu projektach badawczych.

Przedstawiona do recenzji praca spełnia wymagania stawiane w odnośnych przepisach pracom doktorskim.

Dariusz Jankowski

15.11.2025 r.