

Gdynia, 2026-01-05

prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki
Katedra Energoelektroniki
Wydział Elektryczny
Uniwersytet Morski w Gdyni

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 9.01.2026
Zarejestrowano pod nr 510.10.6/25
Podpis *Sm*

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Anny Magdaleny Paleczek nt. „Uczenie maszynowe w systemach elektronicznego nosa: estymacja parametrów metabolicznych i detekcja chorób” („Machine Learning in Electronic Nose Systems: Estimation of Metabolic Parameters and Disease Detection”)

1. Uwagi ogólne

Niniejsza recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Magdaleny Paleczek została przygotowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Rozprawa ta dotyczy badań systemu elektronicznego nosa i algorytmów uczenia maszynowego w zastosowaniu do wykrywania cukrzycy na podstawie analizy składu wydechanego powietrza. Przeprowadzono zarówno badania laboratoryjne, jak i eksperyment kliniczny. Tematyka i zakres tej rozprawy mieści się w dyscyplinie naukowej Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Doktorantka przedstawiła w ocenianej rozprawie wyniki swoich badań stanowiących istotne przyczynki w zakresie techniki sensorowej, metod uczenia maszynowego oraz elektronicznych narzędzi do diagnostyki medycznej. Rozprawa doktorska stanowi kompozycję oryginalnego tekstu rozprawy oraz 7 prac naukowych opublikowanych wcześniej z udziałem Doktorantki, które zostały wkomponowane w poszczególne rozdziały tej rozprawy. Doktorantka prezentuje w niej swoje osiągnięcia w zakresie tematu rozprawy na tle osiągnięć innych autorów.

Autorka zaproponowała zastosowanie metod uczenia maszynowego do analizy wyników detekcji składu wydechanego powietrza za pomocą elektronicznego nosa. W oparciu o uzyskane wyniki można skutecznie zdiagnozować, czy badana osoba choruje na cukrzycę, czy jest zdrowa. Przeprowadzone testy potwierdziły, że zaproponowane narzędzie diagnostyczne wykazuje zadawalającą skuteczność nawet w warunkach zakłócenia

wywołanego obecnością innych gazów w wydychanym powietrzu. Testy przeprowadzono zarówno w warunkach laboratoryjnych stosując syntetyczne mieszaniny gazów testowych oraz przeprowadzono eksperyment medyczny z udziałem ludzi. Przedstawione zostały efekty zarówno badań laboratoryjnych, jak i eksperymentów klinicznych.

Poruszane w pracy zagadnienia są ważne z punktu widzenia efektywnych metod badań przesiewowych przy diagnostyce cukrzycy. Wnoszą też one istotny wkład w rozwój techniki sensorowej oraz zastosowania metod uczenia maszynowego.

Tematyka podjęta w ocenianej pracy doktorskiej jest aktualna i ważna, a częściowe problemy rozważane przez Doktorantkę są również poruszane w licznych pracach innych autorów, opublikowanych w kilkunastu ostatnich latach. Dowodzi to trafnego wyboru zagadnienia badawczego, a fakt opublikowania wyników częściowych w czasopiśmie o uznanej renomie potwierdza wartość naukową tych wyników.

Doktorantka wykazała, że zaproponowane przez nią algorytmy obliczeniowe oraz systemy czujników tworzące elektroniczny nos są efektywne w rozważanej aplikacji dedykowanej do zastosowań w diagnostyce medycznej. Przedstawione w rozprawie wyniki badań dowodzą wysokich kompetencji Doktorantki w zakresie techniki sensorowej, metod uczenia maszynowego, systemów diagnostyki medycznej oraz planowania i realizacji badań naukowych.

2. Ocena merytoryczna pracy

Praca liczy łącznie 133 strony i zawiera 5 rozdziałów, wykaz cytowanej literatury, a także spis treści, listę skrótów, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz podziękowania i wykazy rysunków, listę artykułów włączonych do treści rozprawy oraz wykaz osiągnięć autorki rozprawy. W treści rozprawy ujęto pełne teksty 7 prac Doktorantki, które tworzą wybrane podrozdziały. Zajmują one łącznie 89 stron.

W rozdziale pierwszym Autorka przedstawiła podstawowe informacje na temat możliwości diagnozowania różnych chorób przy wykorzystaniu analizy składu wydychanego powietrza. Podkreślono nieinwazyjność takich metod oraz wskazano podstawowe komponenty systemów diagnostycznych opartych na wykorzystaniu elektronicznego nosa. Wskazano też problemy występujące w dotychczas stosowanych systemach i sformułowano cel badań oraz hipotezę badawczą. Hipoteza ta brzmi następująco: „System e-nosa, wspierany przez dedykowane algorytmy uczenia maszynowego, może skutecznie przewidywać wybrane parametry metaboliczne i klasyfikować próbki w zależności od stanu zdrowia pacjenta”. W rozdziale tym przedstawiono też podstawowe informacje o zawartości kolejnych rozdziałów.

Rozdział drugi prezentuje informacje literaturowe na temat analizy składu wydychanego powietrza w zastosowaniu do wykrywania różnych schorzeń. Skupiono uwagę na wykorzystaniu elektronicznego nosa oraz algorytmów uczenia maszynowego. W szczególności wskazano rodzaje czujników wykorzystywanych w elektronicznym nosie i krótko scharakteryzowano zalety każdego z nich. Wymieniono także metody wykorzystywane do analizy składu analizowanej mieszaniny gazów. Opisano też czynności realizowane podczas takiej analizy. Przedstawiono problemy związane ze stosowaniem rozważanej grupy metod diagnostycznych i wskazano możliwość rozwiązania części tych problemów dzięki zastosowaniu technik uczenia maszynowego. Zaprezentowano przegląd chorób wykrywanych przez analizę wydychanego powietrza. Należą do nich nowotwory, choroby układu oddechowego, przewlekłe choroby nerek, wybrane zakażenia bakteryjne i choroby związane z nietolerancją różnych cukrów. Wskazano na rozwój metod diagnozowania cukrzycy. W rozdziale tym zawarto także teksty jednego rozdziału autorstwa Doktorantki pt. „Recent achievements of exhaled breath analysis at the research stage – Artificial intelligence and machine learning algorithms” opublikowanego w książce *Exhaled Breath Analysis* oraz artykuł autorstwa Doktorantki i jej promotora pt. „Review of the algorithms used in exhaled breath analysis for the detection of diabetes” opublikowanego w czasopiśmie *Journal of Breath Research*. Prace te opisują zastosowanie elektronicznego nosa i uczenia maszynowego w medycynie oraz przegląd algorytmów uczenia maszynowego stosowanych w wykrywaniu cukrzycy. W zamieszczonych pracach występują odwołania aż do 236 pozycji literaturowych.

Rozdział 3 prezentuje wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzonych przez Doktorantkę. Badania te dotyczyły wykorzystania elektronicznego nosa do wykrywania biomarkerów chorób metabolicznych. Zbadano zarówno przygotowane próbki zawierające sztucznie przygotowane mieszaniny gazów o proporcjach dobranych według danych literaturowych. Dużo uwagi poświęcono na wykrywanie acetonu. Uzasadniono potrzebę stosowania algorytmów uczenia maszynowego do analizy danych uzyskiwanych z systemu nosa elektronicznego. Wykorzystano algorytmy regresji do przewidywania stężeń poszczególnych gazów pełniących rolę biomarkerów oraz algorytmy klasyfikacji do rozróżniania próbek odpowiadających różnym stadiom rozwoju choroby. W treści tego rozdziału zawarto też teksty trzech prac opublikowanych uprzednio z udziałem Doktorantki. Pierwsza z nich pt. „Artificial breath classification using XGBoost algorithm for diabetes detections” została opublikowana w czasopiśmie *Sensors*. W artykule tym przedstawiono wyniki badań opracowanego systemu w zakresie wykrywania cukrzycy w oparciu o stężenie

acetonu w wydychanym powietrzu. Rozważano próbki o różnych stężeniach acetonu, zawierające domieszki takich substancji jak etanol, propan, etylobenzen i dwutlenek węgla oraz para wodna w stężeniach odpowiadających oddechom osób zdrowych oraz chorych na cukrzycę. Przetestowano różne algorytmy uczenia maszynowego do klasyfikacji próbek. Najlepsze efekty przynosi stosowanie algorytmu XGBoost. Uzyskano za pomocą tego algorytmu bardzo wysoką dokładność, czułość i swoistość. Według deklaracji zawartej w tym artykule Doktorantka odgrywała wiodącą rolę przy jego przygotowaniu, bo była twórcą koncepcji, opracowała metodologię badań i oprogramowanie, przygotowała dane i pierwszą wersję artykułu oraz współuczestniczyła w testach algorytmu, analizie jego efektywności oraz prowadzeniu badań. Drugi artykuł pt. „The effect of high ethanol concentration on E-nose response for diabetes detection in exhaled breath: Laboratory studies” opublikowany w czasopiśmie *Sensors and Actuators B: Chemical* przez Doktorantkę z promotorem analizuje zakłócający wpływ etanolu na dokładność pomiaru stężenia acetonu w wydychanym powietrzu. W omawianym artykule wykazano, że odpowiednio dobrane metody uczenia maszynowego mogą skutecznie kompensować wpływ obecności etanolu na dokładność przewidywania stężenia acetonu przy korzystaniu z detektorów 3 gazów: acetonu, etanolu i dwutlenku węgla. Trzeci artykuł pt. „Prediction of diabetes state using artificial breath and e-nose system supported by machine learning” opublikowany został w materiałach 8th International Conference on Bio-Sensing Technology. W artykule tym przedstawiono wyniki badań skuteczności algorytmu CatBoost w odniesieniu do przewidywania stanu zdrowia i zaklasyfikowania osób do grupy zdrowych, chorych na cukrzycę oraz będących w stanie przedcukrzycowym. Udowodniono, że system elektronicznego nosa wraz z metodami uczenia maszynowego pozwala nie tylko na wykrycie stanu chorobowego, ale może być także wykorzystany do wstępnej diagnostyki chorób metabolicznych.

Rozdział 4 prezentuje wyniki eksperymentu medycznego obejmującego badania przeprowadzone przez Doktorantkę we współpracy z pracownikami Wydziału Lekarskiego Uniwersytetu Jagiellońskiego. W badaniach uczestniczyło ponad 150 osób w różnym wieku. Dla osób tych wyznaczono statystyczne dane dotyczące ich wieku, wzrostu i masy oraz wybranych wyników analiz ich krwi. Dla każdej z tych osób przeprowadzono analizę wydychanego powietrza przy zastosowaniu systemu nosa elektronicznego. Celem badań było wyznaczenie poziomu cholesterolu w oparciu o analizę składu wydychanego powietrza. Wyniki badań przedstawiono w artykule pt. „Noninvasive total cholesterol level measurement using an e-nose system and machine learning on exhaled breath samples” opublikowanym w czasopiśmie *ACS Sensors*. W artykule tym Doktorantka odpowiadała za przygotowanie jego

koncepcji, metodologii badań, przeprowadzenie badań, analizę formalną, przygotowanie danych, oprogramowanie, opracowanie rysunków, przygotowanie pierwszej wersji tekstu i jego końcową redakcję. W rozważanym artykule wskazano, że system elektronicznego nosa wraz z algorytmem uczenia maszynowego mogą skutecznie przewidywać poziom całkowitego cholesterolu na podstawie analizy wydechu. Drugi artykuł pt. „Revolutionizing health monitoring: A three-gas sensor system powered by machine learning for predicting cholesterol, glucose, and uric acid levels from exhaled breath” zamieszczony w materiałach 47th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology wskazuje na związek między sygnałami pochodzącymi z czujników zawartych w nosie elektronicznym a poziomem takich markerów biochemicznych jak poziom glukozy i kwasu moczowego. Dane zawarte w rozdziale 4 wskazują, że testowy system elektronicznego nosa może być efektywnie wykorzystywany nie tylko w badaniach laboratoryjnych, ale także w testach klinicznych.

Rozdział 5 zawiera podsumowanie zawartości rozprawy i najważniejsze wnioski z przeprowadzonych badań oraz kierunki przyszłych prac badawczych. Doktorantka wymieniła swoje najważniejsze osiągnięcia naukowe opisane w rozprawie. Wskazane zostały też dalsze perspektywy rozwoju tematyki badawczej będącej przedmiotem rozprawy doktorskiej.

Wykaz literatury przywołanej w sekcji Bibliography zawiera łącznie 91 pozycji. Dodatkowo, w każdym z artykułów włączonych do treści rozprawy występują niezależne wykazy literatury. Cytowane prace są w większości wydane w ostatnich 15 latach, a zatem są one aktualne. Dobór cytowanych prac świadczy o dobrej orientacji Doktorantki we współczesnej wiedzy z zakresu techniki sensorowej, metod uczenia maszynowego, inżynierii biomedycznej oraz zastosowań elektroniki w diagnostyce medycznej.

3. Uwagi ogólne

Praca jest napisana w języku angielskim, w sposób na ogół zrozumiały. Jest ona zredagowana bardzo starannie i zawiera tylko drobne błędy redakcyjne. Autorka zadbała o wyjaśnienie używanych skrótów i prawidłowo dobrała kolejność prezentowanych zagadnień. Przyjęta forma rozprawy zawierającej pełne teksty opublikowanych wcześniej prac wskazuje z jednej strony na dobre zaplanowanie publikacji prezentujących wyniki badań, ale z drugiej strony skutkuje tym, że część treści zawartych w tych pracach się pokrywa. Korzyścią z publikowania cząstkowych wyników badań jest możliwość uwzględnienia sugestii recenzentów w kolejnych etapach prowadzenia badań i ewentualna korekta wcześniejszych planów badawczych.

Zamieszczone w rozprawie rysunki są dobrze dobrane i ułatwiają zrozumienie zagadnień poruszanych przez Autorkę. Bardzo duża liczba prac innych autorów przywołanych w wykazie bibliografii rozprawy oraz poszczególnych artykułów świadczy o szerokim zainteresowaniu innych badaczy tematyką ocenianej rozprawy i o dobrym rozpoznaniu przez Doktorantkę stanu wiedzy w zakresie tematu rozprawy.

W pracy przedstawiono wyniki badań Autorki dotyczące zastosowania systemu detektorów gazów tworzących elektroniczny nos i metod uczenia maszynowego do analizy składu wydychanego powietrza i wykrywania na tej podstawie symptomów cukrzycy. Zbadane zostały możliwości wykorzystania różnych zestawów czujników i różnych algorytmów klasyfikacyjnych w procesie diagnostycznym. Oprócz rozważań teoretycznych i badań laboratoryjnych przeprowadzono też z sukcesem eksperymenty medyczne.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych Doktorantki, przedstawionych w recenzowanej rozprawie, można zaliczyć:

- Zaprojektowanie i przetestowanie systemu elektronicznego nosa umożliwiającego analizę mieszanin gazów;
- Opracowanie składów chemicznych mieszanin gazów do testów laboratoryjnych symulujących różne stężenia biomarkerów i zawierających różne składniki zakłócające wynik testów;
- Wybór i testy wielu algorytmów uczenia maszynowego pod kątem ich zastosowania do klasyfikacji chorób i przewidywania stężeń biomarkerów;
- Skuteczna klasyfikacja przygotowanych próbek laboratoryjnych na 3 grupy odpowiadające osobom zdrowym, osobom w stanie przedcukrzycowym oraz osobom chorym;
- Skuteczne przewidywanie stężeń acetonu w obecności czynników zakłócających w testowych mieszaninach gazów i przewidywanie ilościowe biomarkerów;
- Przeprowadzenie badań doświadczalnych na dużej grupie pacjentów w warunkach klinicznych i dokonanie oceny praktycznej użyteczności opracowanego narzędzia diagnostycznego;
- Przeprowadzenie testów efektywności przewidywania stężeń cholesterolu, glukozy i kwasu moczowego we krwi w oparciu o analizę wydychanego powietrza.
- Opublikowanie wyników prac badawczych w czasopismach indeksowanych w JCR.

Osiągnięcia te dowodzą, że Doktorantka opanowała umiejętność formułowania problemów badawczych i ich rozwiązywania przy zastosowaniu nowoczesnych metod naukowych. Oceniana rozprawa dowodzi, że Doktorantka opanowała zaawansowaną wiedzę z zakresu techniki sensorowej, metod uczenia maszynowego, diagnostyki biomedycznej, planowania i wykonywania eksperymentów naukowych oraz potrafi twórczo ją wzbogacać.

Podczas lektury tej interesującej pracy nasunęło mi się kilka pytań:

- a) Jaki długi jest czas trwania jednego testu analizy składu wydychanego powietrza przez system skonstruowany przez Doktorantkę i jaki czas musi upłynąć między kolejnymi testami?
- b) Jakie działania należy podjąć, aby można było zastosować opracowany system w szybkich testach klinicznych lub badaniach przesiewowych?
- c) Czy Doktorantka podjęła prace nad przygotowaniem aplikacji mobilnej, która umożliwiłaby zgrubną kontrolę biomarkerów bez potrzeby pobierania krwi, tylko w oparciu o analizę wydychanego powietrza?
- d) Czy rozwój konstrukcji czujników różnych gazów może pozwolić w ciągu kilku lat na rozszerzenie zbioru biomarkerów, których stężenia będzie można wyznaczać tylko w oparciu o analizę wydychanego powietrza?

Uwagi powyższe mają charakter dyskusyjny i w żadnym stopniu nie obniżają wysokiej oceny pracy.

4. Uwagi szczegółowe

Oceniana praca jest zredagowana bardzo starannie, ale Autorka nie ustrzegła się drobnych uchybień, które jednak nie wpływają w istotny sposób na jednoznacznie pozytywną ocenę pracy. Wybrane z tych uchybień zebrano poniżej.

- a) Prace w wykazie literatury powinny być uszeregowane alfabetycznie według nazwisk autorów.
- b) W wykazie artykułów brakuje pełnych danych bibliograficznych dla publikacji konferencyjnych [AP5] i [AP7] oraz rozdziału w książce [AP2].
- c) Tytuł artykułu zawartego w sekcji 3.3 jest inny niż pracy [AP5] ujętej w wykazie artykułów na s. 10.
- d) W części wstępnej sekcji 3 (strony 74-76) są odwołania do prac [AP1], [AP2] i [AP3], a powinny być odwołania do prac [AP3], [AP4] i [AP5].
- e) W niektórych artykułach współautorskich ([AP2], [AP5], [AP7]) nie jest jasno określony wkład Doktorantki w powstanie tych prac.

5. Wniosek końcowy

Oceniana praca zawiera oryginalne i wartościowe wyniki stanowiące istotny wkład Doktorantki w badania systemów sensorowych i algorytmów uczenia maszynowego w aplikacjach biomedycznych. Doktorantka samodzielnie rozwiązała ważne zagadnienie badawcze z zakresu dyscypliny naukowej Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne oraz wykazała się znajomością aktualnej literatury naukowej w zakresie tematyki rozprawy. Przedstawione wyniki badań dowodzą wysokich kompetencji merytorycznych Doktorantki oraz Jej przygotowania do prowadzenia badań naukowych.

Pytania sformułowane w punkcie 3 wymagają ustosunkowania się do nich Doktorantki w czasie obrony. Mam nadzieję, że będą one podstawą do dyskusji o kierunkach rozwoju tematyki badawczej poruszanej w ocenianej rozprawie.

W mojej opinii praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy prawa. W związku z tym zgłaszam wniosek do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie o dopuszczenie mgr inż. Anny Magdaleny Paleczek do publicznej obrony.

Ze względu na wysoki poziom przeprowadzonych badań, ich potencjał aplikacyjny, fakt opublikowania znaczącej części wyników tych badań w czasopismach znajdujących się na liście ministerialnej oraz ujętych w JCR oraz wysoką aktywność publikacyjną i projektową Doktorantki wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Magdaleny Paleczek.

Górecki