

Gliwice, dn. 30 kwietnia 2021 r.

dr hab. inż. Erwin MACIAK, prof. PŚ  
Politechnika Śląska  
Wydział Elektryczny  
Katedra Optoelektroniki  
ul. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: **Mikroprocesorowy system pobierania próbek frakcji pęcherzykowej do analizatorów powietrza wydychanego przez człowieka**

Autor rozprawy: **mjr mgr inż. Artur PROKOPIUK**

Promotor rozprawy: **płk dr hab. inż. Jacek WOJTAS, prof. WAT**

Promotor pomocniczy: **ppłk dr inż. Janusz MIKOŁAJCZYK**

*Niniejsza recenzja została przygotowana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika” Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego, na podstawie pisma przesłanego przez Przewodniczącą Rady Dyscypliny, Pana Profesora Jana K. Jabczyńskiego – pismo z dnia 22 lutego 2021 r.*

### 1. Charakterystyka wyboru tematu i wartość naukowa rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa Pana mgr. inż. A. Prokopiuka porusza ważny i aktualny temat dotyczący rozwoju i udoskonalania diagnostyki medycznej wykorzystującej fotoniczne technologie sensorowe do detekcji biomarkerów pobieranych z wydychanego powietrza pacjenta. Biomarkery wprowadzono do terminologii medycznej ponad dwie dekady temu. Biomarker jest cechą, która może być rzetelnie zmierzona (monitorowana) i która może być zastosowana do analizy i oceny procesów fizjologicznych oraz patologicznych zachodzących w organizmie. A także służy do monitorowania odpowiedzi organizmu na działania terapeutyczne. Do diagnostyki opartej na biomarkerach może służyć badanie jakiegokolwiek cząsteczki lub materiału (np. komórki, tkanki, związku chemicznego), który odzwierciedla proces chorobowy lub wynik leczenia. Biomarkerami nazywa się zwykle niektóre białka obecne na komórkach nowotworowych, których poziom bada się z tkanki guza albo mutacje w genach, które mogą określać rokowanie lub być pomocne w wyborze optymalnej terapii. W szerokim ujęciu biomarkerami są również wyniki pomiaru różnych parametrów, takich jak natężona objętość wydechu pierwszosekundowa, ciśnienie tętnicze, stężenie we krwi markerów zapalenia, a także zmiany stwierdzone w badaniach obrazowych i inne. Biomarkerami są także niektóre anality chemiczne, które można oznaczyć z wydychanej mieszaniny gazowej. Wydychane powietrze zawiera tysiące różnych związków chemicznych. Pewne związki chemiczne, takie jak LZO (lotne związki organiczne) pojawiają się w wydychanym powietrzu u osób z pewnymi chorobami i mogą działać na przykład jako biomarkery dla celów wykrywania zmian nowotworowych.

W ostatnich latach obserwuje się ogromne zainteresowanie zarówno środowisk naukowych, jak i medycznych badaniami nad nieinwazyjnymi metodami diagnozowania stanów chorobowych z wykorzystaniem monitorowania biomarkerów pobieranych z próbek gazowych wydychanego powietrza. Detekcja tych charakterystycznych substancji w wydychanym powietrzu może dostarczyć istotnych informacji o prawidłowym toku lub zaburzeniu procesów biochemicznych zachodzących w organizmie. Diagnostyka medyczna oparta na analizie oddechu jest nieinwazyjna, bezbolesna i może dać szybką odpowiedź o istnieniu danego schorzenia. Ponadto proces pobrania próbki jest relatywnie łatwy w realizacji zarówno dla pacjenta, jak i personelu medycznego. Dodatkowo proces ten jest dość komfortowy dla pacjenta.

Dlatego istnieje realna potrzeba wczesnego wykrywania różnego rodzaju schorzeń, gdy ich objawy są niespecyficzne lub są utożsamiane z innymi chorobami. Testy bazujące na analizie związków z mieszaniny gazów oddechowych mogą zostać użyte jako testy pierwszego rzutu przed badaniami inwazyjnymi. Wczesna diagnostyka schorzeń daje pacjentom więcej możliwości leczenia i przede wszystkim szansę na dłuższe życie w lepszej kondycji zdrowotnej. Nowe metody diagnostyki mogą przyczynić się do zwiększenia wykrywalności takich schorzeń jak nowotwory, astma, cukrzyca, i wiele innych we wczesnym ich stadium, kiedy szansa na wyzdrowienie jest rzeczywista.

Analizując to szerokie spektrum zagadnień związanych z nieinwazyjną diagnostyką medyczną wykorzystującą monitoring biomarkerów z wydychanego powietrza, Autor rozprawy skoncentrował się na zagadnieniu detekcji tlenku azotu (NO). Rozprawa dotyczy opracowania metodyki pobierania próbek powietrza wydychanego przez człowieka, które są analizowane przez optoelektroniczny czujnik gazu wykorzystujący laserową spektroskopię absorpcyjną. Rozwój fotonicznych i optoelektronicznych technologii sensorowych umożliwia obecnie wykrycie śladowych ilości NO – biomarkera astmy. Autor w rozprawie udowadnia, że techniki te wraz z dedykowanym oprzyrządowaniem do poboru próbek gazowych mogą być zastosowane do przeprowadzenia nieinwazyjnych badań. Efektem pracy jest **opracowanie mikroprocesorowego systemu pobierania próbek (SPP)**, który może być jednym z istotnych narzędzi stosowanym do badań przesiewowych pod kątem wykrywania chorób, których biomarkerem jest tlenek azotu (NO). Rozprawa przedstawia również szerzej możliwości zastosowania metod spektroskopowych do badań przesiewowych w diagnostyce medycznej przy użyciu czujników optoelektronicznych.

Na ocenę rozprawy doktorskiej wpłynęła analiza następujących elementów: temat i zakres pracy, kompozycja i budowa rozprawy, metodologia badawcza, a także strona warsztatowa pracy oraz jej treść merytoryczna. Najistotniejsze elementy to temat, zastosowane metody badawcze oraz część merytoryczna.

**2. Wartość merytoryczna rozprawy. Umiejętność wprowadzenia w tematykę badawczą i jasność sformułowanych problemów badawczych, dobór metod badawczych i narzędzi statystycznych do analizy danych, sposób przedstawienia wyników, krytyczna analiza wyników i umiejętność ich interpretacji na tle literatury przedmiotu, jasność i poprawność wniosków.**

Odnosząc się bezpośrednio do recenzowanej rozprawy doktorskiej mgr. inż. Artura Prokopiuka należy zauważyć, że temat pracy został wybrany trafnie. Praca ma odpowiednią pod względem formalnym postać; posiada klarowny podział na rozdziały i podrozdziały, a jej treść Autor wzbogacił licznymi tabelami (29) oraz rysunkami i wykresami (85) bardzo dobrze korespondującymi z

omawianymi zagadnieniami. Rozprawa napisana jest poprawnym i zrozumiałym językiem. Układ pracy jest bardzo przejrzysty.

W rozdziale I, który stanowi wprowadzenie do dysertacji, Autor prowadzi czytelnika w świat diagnostyki medycznej opartej na analizie analitów chemicznych z próbek wydychanego powietrza. We wprowadzeniu Autor syntetycznie przedstawia genezę i motywację realizowanych prac, a także przedstawia badawczo-konstrukcyjny wymiar dysertacji.

W rozdziale II Doktorant opisuje aktualny stan wiedzy w tematyce przedmiotu badań. Rozdział II rozpoczyna się generalną analizą metod i systemów do poboru próbek oddechu, metod przechowywania i transportowania próbek. Następnie przedstawia analizę i rozdział faz wydechu. Ostatecznie Autor prezentuje wybrane, komercyjne rozwiązania dostępnych systemów poboru i pomiaru biomarkerów. Na podstawie dokonanej klasyfikacji urządzeń z uwzględnieniem ich najważniejszych cech, m.in. stosowanie procedur separacji faz wydechu, możliwość pracy w różnych trybach wyprowadza wnioski sprowadzające się do sformułowania generalnych wymagań stawianych systemom pobierania próbek. Uwagę zwrócono również na spełnienie wytycznych Amerykańskiego Towarzystwa Chorób Układu Oddechowego (ATS) i Europejskiego Towarzystwa Oddechowego (ERS)

Rozdział III przedstawia tezę dysertacji i cele szczegółowe pracy wraz z omówieniem problemu badawczego.

W rozdziale czwartym przedstawiono projekt systemu pobierania próbek. Przeprowadzono analizę teoretyczną modelu czujnika NDIR do pomiaru stężenia CO<sub>2</sub> w wydychanym powietrzu oraz wyselekcjonowano czujniki do pomiarów wilgotności, temperatury i ciśnienia. W rozdziale IV przedstawiony został ponadto funkcjonalny algorytm działania systemu pobierania próbek oraz jego podstawowe bloki funkcjonalne, obejmujące układ dystrybucji powietrza, układ monitorowania parametrów wydychanego powietrza oraz układu separacji faz wydechu. Opracowany został również algorytm wyznaczania początku III fazy (fazy pęcherzykowej) i procedury separacji faz wydechu. Autor nie pomija w procesie optymalizacji aspektów praktycznych finalnej realizacji systemu. Jest to zasadniczy rozdział pracy prezentujący w szczególności konstrukcję systemu SPP.

W kolejnym rozdziale Autor przedstawia proces testowania i walidacji bloków funkcjonalnych SPP. Bloki zostały poddane badaniom mającym na celu weryfikację krytycznych parametrów systemu. Ponadto w rozdziale V Pan Prokopiuk dokonał weryfikacji zgodności działania systemu SPP z wymaganiami ATS/ERS w zakresie zapewnienia bezpiecznych dla pacjenta poziomów ciśnień oraz przepływu wydychanego powietrza, zapewniającego selektywne pobranie próbki powietrza z dolnych dróg oddechowych. Doktorant przeprowadził również weryfikację SPP w zakresie procedury swobodnego wdechu i wydechu. Autor wykazał, iż algorytm został opracowany poprawnie i niezależnie od kształtu charakterystyki stężenia CO<sub>2</sub> w wydechu człowieka prawidłowo wykrywa początek III fazy wydechu. Rozdział kończy się wyznaczeniem zmiany objętości fazy pęcherzykowej przed oraz po korekcji wskazań czujnika CO<sub>2</sub>.

Dalszy etap badań, przedstawiony w rozdziale VI, dotyczy przeprowadzenia holistycznych testów systemu SPP, również w warunkach operacyjnych tzn. w warunkach klinicznych. Przeprowadzono badania porównawcze opracowanego systemu SPP z komercyjnym urządzeniem BreathSampler pracującego w oparciu o metodę wyznaczania początku III fazy na podstawie stałego progu stężenia CO<sub>2</sub> w wydychanym powietrzu. Dowiedziono, że amplituda piku izoprenu w próbce zgromadzonej z wykorzystaniem SPP jest większa względem próbki zgromadzonej z wykorzystaniem BreathSamplera. Wykazano także zwiększenie amplitudy piku acetonitrylu i acetonu co potwierdziło, że SPP umożliwia

niezakłócone pobranie dużych objętości innych biomarkerów. Finalnie, przy użyciu SPP pobrane zostały próbki powietrza wydychanego przez pacjentów ze zdiagnozowanymi chorobami układu oddechowego. Wyniki badań w warunkach operacyjnych potwierdziły wnioski z badań laboratoryjnych SPP oraz ostatecznie dowiodły spełnienie wymagań dotyczących wydzielenia i zgromadzenia III fazy wydechu pacjenta w celu wyznaczenia stężenia biomarkera jakim jest tlenek azotu. Można zatem stwierdzić, że przeprowadzone badania potwierdziły tezę, że po przeprowadzeniu korekcji wskazań czujnika CO<sub>2</sub> oraz implementacji w SPP zaproponowanego algorytmu analizy kształtu charakterystyki zmian stężenia CO<sub>2</sub>.

Praca liczy 143 strony i zawiera siedem rozdziałów. Obejmuje ponadto wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów oraz bardzo bogaty wykaz cytowanej literatury. Wykaz cytowanych prac zawarty na 13 stronach zawiera 239 pozycji, w tym witryny internetowe. W zestawieniu literatury jest obecnych 7 prac, w których przygotowaniu uczestniczył Autor. W większości są to prace zespołowe w liczących się periodykach naukowych dotyczących fotonicznych i optoelektronicznych technik sensorowych. Dobór cytowanych prac i materiałów świadczy o bardzo dobrej orientacji Doktoranta w przedmiotowej tematyce dotyczącej systemów pobierania próbek gazowych i detekcji śladowych koncentracji charakterystycznych związków różnymi technikami pomiarowymi. Autor powołuje się zarówno na prace fundamentalne, jak i nowe opracowania naukowe prezentujące najnowsze trendy rozwoju diagnostyki z wykorzystaniem markerów oddechowych. Moją szczególną uwagę zwrócił fakt, że rozprawa zawiera bardzo dobrze przygotowany przegląd dostępnych systemów poboru próbek gazowych z wyszczególnieniem technik pomiarowych służących do pomiaru ultraniskich koncentracji specyficznych analitów gazowych – w tym biomarkerów.

### 3. Czy postawiony problem badawczy został rozwiązany?

Celem pracy było opracowanie systemu pobierania próbek wydychanego powietrza, z uwzględnieniem funkcjonalności optoelektronicznego czujnika gazu NO. Parametry SPP zostały m.in. dopasowane do wymagań zdefiniowanych przez optoelektroniczny układ pomiarowy, który wykorzystuje laserową spektroskopię strat we wnęce optycznej. Problem ponadto dotyczył wyselekcjonowaniu III fazy wydechu przy spełnieniu wymagań stawianych urządzeniom medycznym. Cel ten został osiągnięty, a opracowana metodologia badań analitycznych i eksperymentalnych oraz wyniki tych badań zostały szczegółowo opisane w rozdziałach IV – VI.

Autor postawił tezę rozprawy doktorskiej w brzmieniu: ***Możliwa jest maksymalizacja objętości frakcji pęcherzykowej pobranej z powietrza wydychanego przez człowieka w wyniku minimalizacji wpływu ciśnienia i temperatury próbki na sygnał wyjściowy czujnika CO<sub>2</sub> oraz implementacji algorytmu analizy szybkości jego zmiany do wyznaczania początku III fazy wydechu.***

Tlenek azotu pochodzący z przemian metabolicznych organizmu znajduje się w pęcherzykach płucnych. Dlatego konieczne jest pobranie i zgromadzenie tylko tej części wydychanego powietrza, gdyż koncentracja NO będzie potencjalnie najwyższa w tej fazie. Wyekstrahowanie próbki oddechu powinno odbywać się zatem w ściśle określony sposób, w tzw. fazie wydechu. Faza o największym stężeniu NO pochodzącego z pęcherzyków płucnych to tzw. III faza wydechu lub frakcja pęcherzykowa. Ze względu na bardzo małe koncentracje NO nie można bezpośrednio zidentyfikować tej fazy poprzez pomiar koncentracji NO i konieczne jest zastosowanie metody pośredniej. W tym celu Autor posłużył

się metodą monitorowania stężenia ditlenku węgla, wykorzystując korelację pomiędzy stężeniem CO<sub>2</sub> a fazami wydechu człowieka.

Doktorant przeprowadził symulacje, które umożliwiły zdefiniowanie wymagań dotyczących poszczególnych składowych systemu, a następnie na ich podstawie dokonał oceny właściwości komercyjnie dostępnych czujników ciśnienia, temperatury, wilgotności oraz innych elementów niezbędnych do opracowania SPP. Szczególną uwagę Autor poświęcił konstrukcji czujnika CO<sub>2</sub>. Zastosowana metodyka korekcji spowodowała zwiększenie zgromadzonej objętości III fazy wydechu nawet o ponad 10%. W celu określenia przewidywanego wzrostu stężenia biomarkera w próbce wydechu, przebadano zmiany stężenia CO<sub>2</sub> w wydzielonej III fazie wydechu w stosunku do stężenia CO<sub>2</sub> w próbce wydechu bez separacji faz. Do wyznaczenia początku III fazy wydechu opracowany został autorski algorytm analizujący dynamikę zmian średniej kroczącej dla punktów sąsiadujących (SMAA) W pracy wykazano, że metoda ta umożliwia wyznaczenie początku III fazy z dokładnością na poziomie 20 ms. Wykorzystując krzywe kapnograficzne charakterystyczne dla wybranych chorób układu oddechowego, przeprowadzono weryfikację metody  $dSMAA/dt$  wyznaczania początku III fazy wydechu. Wykazano, że zarówno dla krzywych kapnograficznych zarejestrowanych dla osób chorych jak i zdrowych, metoda ta umożliwia wykrycie początku III fazy wydechu z dobrą precyzją.

Tym samym stwierdzam, że teza rozprawy została udowodniona. Pan A. Prokopiuk opracował system, który automatycznie i precyzyjnie wyznacza oraz wydziela frakcję pęcherzykową w sposób niezależny od parametrów wydychanego powietrza, przy jednoczesnym spełnieniu wytycznych Amerykańskiego Towarzystwa Chorób Układu Oddechowego oraz Europejskiego Towarzystwa Oddechowego.

#### **4. Oryginalność badań. Samodzielny i oryginalny dorobek Autora oraz pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę przedmiotu**

Temat dotyczy zagadnienia ważkiego i istotnego, jak już wspomniano, nie tylko w aspekcie naukowym, ale przede wszystkim w aspekcie praktycznej realizacji systemów do nieinwazyjnej diagnostyki medycznej wykorzystującej efektywną analizę biomarkerów oddechowych z fazy pęcherzykowej.

Autor przedstawia i precyzyjnie analizuje w pracy własności metrologiczne i użytkowe rozwiązania.

Zakres rozprawy jest szeroki, gdyż obejmuje zarówno prace dotyczące modelowania, projektowania, realizacji i optymalizacji układów automatyki pomiarowej. Rozprawa oprócz prac projektowo-konstrukcyjnych obejmuje badania oraz analizy weryfikujące opracowane rozwiązania w warunkach laboratoryjnych i operacyjnych, zbliżonych do rzeczywistych warunków pracy (badania kliniczne). Poruszane w rozprawie zagadnienia są ważne i aktualne z punktu widzenia rozwoju systemów do analizy składu wydychanego powietrza, które mogą ułatwić diagnozę wielu chorób. Problematyka sygnalizowana przez Doktoranta w pracy jest szeroko poruszana w bieżącej literaturze przedmiotu obejmującej szeroko pojęte systemy nieinwazyjnej wczesnej diagnostyki medycznej.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i praktycznego oraz wykazuje dobry poziom ogólnej wiedzy teoretycznej w tematyce dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika w zakresie wieloparametrowych układów sterowania i regulacji oraz optoelektronicznych systemów sensorowych. Autor w rozprawie przedstawił

rozwiązanie problemu z wykorzystaniem odpowiednich i poprawnych metod oraz narzędzi badawczych.

Zasadniczą część rozprawy stanowi analiza oraz szczegółowe testy i badania systemu poboru próbek. W świetle przeprowadzonej analizy stanu wiedzy oraz przeglądu dostępnych na rynku rozwiązań tego typu systemów do oryginalnych osiągnięć Pana mgr. inż. A. Prokopiuka należy zaliczyć:

- określenie wymaganych parametrów systemu pobierania próbek z uwzględnieniem uwarunkowań zdefiniowanych przez właściwości układów spektroskopii absorpcyjnej w podczerwieni przeznaczonych do wykrywania tlenu azotu,
- opracowanie koncepcji systemu pobierania próbek wydychanego powietrza do precyzyjnej i szybkiej separacji faz wydechu zapewniającego pobieranie maksymalnej objętości frakcji pęcherzykowej,
- przeprowadzenie eksperymentalnej weryfikacji przyjętej koncepcji z uwzględnieniem ewentualnej korekcji pracy poszczególnych elementów składowych systemu oraz algorytmów analizy danych.
- opracowanie metody korekcji wskazań czujnika CO<sub>2</sub> typu NDIR uwzględniającej parametry próbek wydychanego powietrza,
- opracowanie metody wyznaczania początku III fazy wydechu umożliwiającej maksymalizację objętości frakcji pęcherzykowej, implementacja programowa algorytmu separacji faz oraz weryfikacja praktyczna tej metody,
- przeprowadzenie weryfikacji działania opracowanego SPP w warunkach laboratoryjnych oraz w warunkach klinicznych.

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy stwierdzam, że teza pracy została udowodniona a cele pracy zostały osiągnięte. Rozprawa wnosi elementy **oryginalności w dyscyplinie naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika**. Zaprezentowany w rozprawie system poboru próbek mieszaniny gazów oddechowych jest autorski i ma wymierny aspekt praktyczny. Autor wykazał się umiejętnością adaptacji i wzajemnego łączenia znanych i opracowanych przez siebie metod w celu osiągnięcia założonego celu. Dobrze również oceniam redakcję oraz sposób prezentacji zaproponowanego rozwiązania, metodologii badawczej oraz osiągniętych wyników.

## 5. Uwagi krytyczne. Słabe strony rozprawy

Trzeba podkreślić, że w recenzowanej rozprawie doktorskiej Pana mgr. inż. A. Prokopiuka brakuje zasadniczych wad i uchybień. Praca napisana jest starannie, jak to już zostało wspomniane. Autor przejrzysto oraz krytycznie prezentuje wyniki prac i badań. Jednakże można wskazać kilka uwag i dodatkowe pytania, których wyjaśnienie powinno uzupełnić i wzbogacić treść prezentowanych w rozprawie zagadnień, a mianowicie:

- 1) Praca zawiera relatywnie niewiele błędów i uchybień edytorskich. W pracy zawierającej 128 stron maszynopisu naliczyłem ich niespełna 8. Jest to liczba świadcząca o starannym przygotowaniu dysertacji oraz wielokrotnym i uważnym przeczytaniu pracy przed przedłożeniem do recenzji. Nie będę wszystkich błędów szczegółowo przytaczał, gdyż nie wpływają one na jakość pracy, zwrócę tylko uwagę na te istotniejsze.

- 2) Dla prawidłowej prezentacji danych, rys. 2.9 powinien zostać wyposażony w trzecią oś rzędnych do prezentacji zakresu zmian ciśnienia. Zmienność tej wielkości wprawdzie podano w opisie, niemniej jednak taka prezentacja jest niewystarczająca. Tym bardziej, że Autor potrafił przygotować tego typu prezentację np. na rys. 4.27.
- 3) Wielkość fizyczna – ciśnienie powinna w pracy być oznaczona małą a nie dużą literą p. Nie tylko z powodów uwzględnienia powszechnie uznanych i stosowanych oznaczeń wielkości fizycznych, ale przede wszystkim z powodu kolizji oznaczeń w pracy z mocą sygnału. Było tylko kwestią czasu, gdy w związku z takim oznaczeniem pojawi się w pracy kolizja. Na stronie 61 mamy dwie wielkości  $P_0$ , które mają wartość 1013 mbar i 36 nW.
- 4) W zależności 4.20 na stronie 75 po lewej stronie równania brakuje zapisu granicy przy delta t dążącym do 0, żeby zależność była prawdziwa.

W zakresie zagadnień merytorycznych można jedynie mieć niedosyt w kilku aspektach, gdzie w mojej opinii brakuje nieco bardziej pogłębionej analizy problemu.

- 1) Mam wątpliwości, zresztą podobnie jak Autor (rozdział 6.2), co do wpływu inertywności chemicznej (bądź jej braku) materiałów i elementów zastosowanych do skonstruowania toru dystrybucji i rozdziału mieszaniny gazowej. W wyniku błędnie dobranych materiałów możemy mieć do czynienia z adsorpcją charakterystycznych substancji w torze gazowym, których poziomy koncentracji sięgają rzędów ppbv. Może to mieć znaczenie dla jakości i dokładności realizowanych pomiarów. Brakuje mi w dysertacji szerszej dyskusji tego zagadnienia. Niemniej jednak należy zaznaczyć, że Autor zdaje sobie z tego potencjalnego problemu sprawę i w rozdziale 6 w kilku miejscach sygnalizuje zjawisko, jednak nie analizując go głębiej.
- 2) Komentarza wymaga decyzja zastosowania komercyjnego czujnika CO<sub>2</sub> UT100C w układzie monitorowania parametrów wydychanego powietrza w kontekście przeprowadzonych analiz i badań na autorską konstrukcją czujnika w technologii NDIR (rozdz. 4.4.2 i 4.4.3).
- 3) Kolejny aspekt dotyczy korekcji wskazań czujników wilgotności i CO<sub>2</sub>. W mojej opinii matematyczno inżynierskie podejście jest zastosowane może nie błędnie ale nazbyt pochopnie. Brakuje mi, w przedstawionej analizie powodów korekcji wskazań, odniesienia się do procesów fizykochemicznych w torze przepływu mieszaniny gazowej. Widać to zwłaszcza w przypadku czujnika SHT21, gdzie ewidentnie, w mojej opinii, obserwujemy rzeczywistą zmianę wilgotności gazu spowodowaną występowaniem separacji przestrzennej obydwu czujników: wzorcowego i badanego względem przepływającego gazu w układzie.

Powyższe uwagi mają charakter jedynie dyskusyjny i nie stanowią w mojej opinii kluczowych wad recenzowanej rozprawy doktorskiej, których zasadniczo w niniejszej pracy nie dostrzegłem. Uchybienia te nie wpływają w żadnym stopniu na wysoką ocenę pracy. Jednak biorąc pod uwagę fakt i wymiar praktycznego stosowania systemu SPP bardzo proszę Autora o ustosunkowanie się do merytorycznych uchybień, a w szczególności do problemu inertywności chemicznej zastosowanych materiałów i elementów będących w fizycznym kontakcie z badaną mieszaniną gazową zawierającą markery.

## 6. Ocena końcowa z uzasadnieniem

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa Pana mgr. inż. A. Prokopiuka, zarówno w odniesieniu do badań modelowych i symulacyjnych, jak i w wymiarze prac eksperymentalnych stanowi oryginalny wkład w rozwój dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika. Doktorant z powodzeniem osiągnął cele badawcze i wykazał się wiedzą i umiejętnościami wymaganymi do uzyskania stopnia doktora nauk technicznych. Zatem, ja, niżej podpisany stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Artura Prokopiuka spełnia warunki określone w art. 13.1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2017 r. poz. 1789) oraz w związku z art. 179 ust. 1 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669, z późn. zm.), wnioskuję do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektrotechnika, Elektrotechnika Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego o dopuszczenie p. Prokopiuka do dalszych etapów procedowania przewodu doktorskiego.

Gliwice, 30 kwietnia 2021 r.

.....  
data sporządzenia recenzji



.....  
podpis recenzenta