



Politechnika Lubelska

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

Katedra Elektroniki i Technik Informatycznych

ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin; tel.: (81) 538 43 09; fax: (81) 538 43 12; e-mail: ieti@pollub.pl; http://ieti.pollub.pl

Lublin, dn. 15 marca 2021 r.

prof. dr hab. inż. Piotr Kisała
Katedra Elektroniki i Technik Informatycznych
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Lubelska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mjr. mgr. inż. Artura Prokopiuka:

„Mikroprocesorowy system pobierania próbek frakcji pęcherzykowej do analizatorów powietrza wydychanego przez człowieka”.

Podstawa prawna

- Pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Wojskowej Akademii Nauk z dnia 22 lutego 2021 r.;
- Rozprawa doktorska mjr. mgr. inż. Artura Prokopiuka pt.: „Mikroprocesorowy system pobierania próbek frakcji pęcherzykowej do analizatorów powietrza wydychanego przez człowieka”;
- Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r., poz. 85);
- Ustawa z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2018 r., poz. 1669).

1. Ocena poziomu merytorycznego pracy

Praca doktorska mjr. mgr. inż. Artura Prokopiuka poświęcona jest zagadnieniom związanym z pobieraniem próbek powietrza wydychanego przez człowieka z przeznaczeniem do ich badania z wykorzystaniem laserowej spektroskopii absorpcyjnej. Główny ciężar prac badawczych położony został na badania tlenu azotu, jednakże można stwierdzić, że dotyczy ona także nieinwazyjnych badań polegających na wykrywaniu markerów chorobowych w postaci gazowej. Już na wstępie należy podkreślić, że praca napisana jest bardzo starannie z zachowaniem wszelkich zasad formalnych oraz edycyjnych. Tematyka pracy jest istotna i aktualna. Obecność określonych gazów w wydychanym powietrzu może stanowić podstawę do diagnozy konkretnych jednostek chorobowych. Tlenek azotu (NO), będący głównym przedmiotem analiz Doktoranta jest markerem m.in. astmy i zapalenia dróg oddechowych. W tym miejscu podkreślam również, że praca ma charakter badawczy oraz konstrukcyjny. Struktura rozprawy jest prawidłowa, praca posiada dobrze poprowadzony wstęp, zawierający przejrzyste wprowadzenie w jej tematykę i pozycjonujący pracę obok innych, należących do tego obszaru badawczego. Rozprawa zawiera pięć rozdziałów merytorycznych, których zawartość i aspekty naukowe omówione są poniżej oraz wnioski końcowe, których zasadność i trafność zostały ocenione w dalszej części recenzji. Autor

prawkidlowo formuluje cel oraz teze pracy oraz konsekwentnie, w kazdym rozdziale, udowadnia osiagniecie celu i zasadnosc postawionej tezy badawczej.

Pierwszy rozdzial recenzowanej pracy dotyczy analizy aktualnego stanu wiedzy. Autor przedstawia geneze prac nad opracowanym systemem do pobierania probek powietrza wydychanego przez czlowieka i przedstawia aktualny stan rozwoju sposobow i metod analizy skladu wydychanego powietrza. W rozdziale zestawiono wartosci stzenia wybranych skladnikow powietrza wydychanego przez osoby zdrowe oraz chore i opisano najwazniejsze rodzaje metod pobierania probek. Autor przedstawia wady i zalety metod typu „on-line” oraz „off-line” odnoszac sie do szeregu kluczowych oraz aktualnych pozycji literaturowych. Waznym elementem tej czesci pracy jest opis poszczegolnych faz wydechu i metod ich okreslania. Wykonane w tym rozdziale podzialy metod pomiarowych oraz technik pobierania probek z roznymi kryteriami systematyzuja wiedze, a polaczone z aktualnymi referencjami do najnowszej literatury przedmiotu w tym zakresie stanowia cenny material przegladowy, tak bardzo wymagany w pracach tego typu. Przykladem jest przeglad i opis metod separacji faz wydechu stosowanych w ukladach pobierania probek, podzial faz wydechu czy nawet tabelaryczne zestawienia metod separacji faz. Autor zamiescil w tym rozdziale rowniez zalozenia konstrukcji ukladu do pobierania probek powietrza wydychanego i opisal glowne czynniki wplywajace na sposob budowy projektu tego typu ukladu, np. kapnogramy z przyporzadkowanymi fazami wydechu i wykresy zmian stzenia NO oraz CO₂ w czasie. W tej czesci pracy okreslone zostaly wyznaczniki skutecznosci dzialania systemu pobierania probek dla analizatora NO. Brak wspolnych kryteriow przy okreslaniu faz wydechu i rozbieznosci oraz problemy pojawiajace sie przy analizie krzywych kapnograficznych osob chorych wskazuja na niszę i mozliwosc opracowania wlasnych algorytmow wyznaczania i okreslania parametrów faz wydechu. Stad tez zawartosc omawianego rozdzialu jest jak najbardziej uzasadniona. Doktorant dokonuje takze wyboru sposobu analizy faz wydechu i stosuje metode przyrostow stzenia CO₂. Zestawienia tabelaryczne wybranych ukladow do pobierania probek zdecydowanie porzadkuja informacje i wykazuja umiejetnosc syntetycznego zestawienia najistotniejszych informacji i systematyzowania wiedzy przez Doktoranta. Podsumowujac ta czesc pracy stwierdzam, ze Autor wykonal synteze aktualnego stanu wiedzy dotyczacego problematyki okreslania skladu gazowego powietrza wydychanego przez czlowieka. W koncowej czesci rozdzialu wybrzmiewa stwierdzenie, ze na podstawie danych z poszczegolnych czujnikow oraz opracowanego algorytmu wykrywania poczatku III fazy wydechu, bedzie mozliwe uzyskanie maksymalnej objemosci frakcji pęcherzykowej o maksymalnym stzeniu danego biomarkera. Jest to twierdzenie spójne z postawiona teza, ktora z kolei brzmi: „Mozliwa jest maksymalizacja objemosci frakcji pęcherzykowej pobranej z powietrza wydychanego przez czlowieka w wyniku minimalizacji wplywu cisnienia i temperatury próbki na sygnal wyjsciowy czujnika CO₂ oraz implementacji algorytmu analizy szybkości jego zmiany do wyznaczania III fazy wydechu”. Autor teze te udowadnia konsekwentnie w dalszych rozdzialach rozprawy.

W rozdziale trzecim Autor stawia cel pracy oraz formuluje przytoczona powyzej teze. Przedstawia glowne zadania badawcze, ktorzych realizacja umozliwila spełnienie zakladanego celu. Koncową czescią rozdzialu jest rowniez szczegolowy zakres pracy, sporzadzony w podziale na poszczegolne rozdzialy. Uwazam, ze przedstawienie informacji dotyczacych tego, w jaki sposob Autor „ustawia” cala prace w stosunku do istniejacego stanu wiedzy, poprzez umieszczenie tego rozdzialu po wstepie teoretycznym jest zasadne i dowodzi dojrzalosci jego warsztatu naukowego. Układ taki jest czytelny i eksponuje zasadnosc i celowosc opisanych w rozprawie prac naukowo-badawczych.

Rozdzial czwarty dotyczy analizy parametrów ukladow wchodzacych w sklad systemu pobierania probek. Zaproponowany przez Doktoranta system pobierania probek wspolpracuje z opracowanym w Instytucie Optoelektroniki WAT analizatorem tlenu azotu, ktory wykorzystuje zjawisko zmian dobroci wnęki optycznej lasera wskutek zmian absorpcji NO. Wymaga to precyzyjnej detekcji poszczegolnych faz wydechu, ktore z kolei mozna rozroznic poprzez detekcje stzenia CO₂ w wydychanym powietrzu. Wynik tej detekcji jest jednak zalezny od cisnienia, temperatury, przeplywu i wilgotnosc, co stanowi wyzwanie badawcze, ktorego rozwiazania

podejmuje się Autor. Cały system pobierania powietrza składa się z układu jego dystrybucji, układu monitorowania jego parametrów oraz układu separacji faz wydechu. W tej części pracy zamieszczono założenia poszczególnych układów oraz ich dokładną charakterystykę. Pod względem konstrukcyjnym jest to najbardziej wartościowa część pracy. Zawiera dokładny opis budowy i zasady działania poszczególnych układów stanowiących cały system pobierania powietrza wydychanego. Ważnym elementem jest także wykazanie konieczności korekcji czujnika przepływu powietrza, co jest związane z zależnością szerokości linii absorpcyjnej gazu od temperatury. W tym rozdziale Autor przedstawia również założenia układu separacji faz wydechu i określa czas przeznaczony na korekcję wskazań czujnika CO₂, który z kolei potrzebny jest na wypracowanie decyzji o wyznaczeniu początku fazy III i zadziałania elektro-zaworów. Wykonano również analizę kluczowych parametrów czujników ciśnienia oraz przepływu, przeznaczonych do układu dystrybucji powietrza. Ważnym etapem części anali-tycznej jest określenie parametru SNR czujnika NDIR oraz długości komory pomiarowej, warunkujące możliwość wykonania detekcji ditlenku węgla w wydychanym powietrzu. Autor zamieścił również wyniki analizy niepewności pomiaru stężenia CO₂ i określił wpływ ciśnienia, wilgotności oraz temperatury na pracę czujnika, proponując korekcję wskazań ze względu na zmiany tych wielkości. Wyznaczono również czas wykrycia początku III fazy wydechu w zależności od liczby uśrednień krzywych kapnograficznych, zarówno w przypadku zastosowania metody prostej średniej kroczącej jak również prostej średniej kroczącej dla punktów sąsiadujących.

W rozdziale piątym przedstawiono wyniki badania parametrów elementów systemu pobierania próbek, którego projekt był częścią rozdziału czwartego. Autor wykazuje poprawność działania czujnika ciśnienia oraz procedury wyznaczenia przepływu i zgodność układu z wymaganiami Amerykańskiego Towarzystwa Chorób Klatki Piersiowej oraz Europejskiego Towarzystwa Pulmonologicznego w zakresie bezpieczeństwa pacjenta oraz norm przepływu wydychanego powietrza. Doktorant wyznaczył niepewności pomiaru temperatury oraz wilgotności. Z kolei analiza doboru czujnika CO₂ wykazała konieczność zapewnienia ciągłego przepływu powietrza przez czujnik w celu uniknięcia resztkowych ilości gazu. Przeprowadzone badania wpływu ciśnienia i temperatury powietrza pozwoliły Autorowi na wyznaczenia funkcji korekcji wskazań czujnika CO₂, co z kolei umożliwiło mu uzyskanie wskazań mieszczących się w granicach niepewności deklarowanej przez producenta, tj. do 5% w całym użytecznym zakresie zmian ciśnienia. Zastosowanie tego typu korekcji pozwoliło w dalszym etapie na wykonanie testów algorytmu wyznaczenia III fazy wydechu dla grupy siedmiu osób zdrowych, tj. takich, które nie miały zdiagnozowanych chorób układu oddechowego. W tej części pracy zamieszczone zostały wyniki udowadniające, że opracowany algorytm wyznaczenia III fazy wydechu jest wystarczająco precyzyjny i skuteczny, aby można go było zastosować zarówno w przypadku osób zdrowych jak i chorych, przy czym krzywe kapnograficzne osób chorych pozyskano z literatury dla przypadków: wiotczenia mięśni płuc, kyphoskoliozy, oscylacji kardiologicznych oraz odmy płucnej.

Rozdział szósty zawiera głównie wyniki badań systemu pobierania próbek. Doktorant wykonał analizę chromatograficzną powietrza syntetycznego przed oraz po przejściu przez układ pobierania próbek. Przeprowadził badania, które miały na celu wskazać ewentualne straty tlenu azotu w samym układzie pobierania próbek. Przeprowadzone badania udowodniły, że straty takie są pomijalne. Autor wykonał także analizę ilości biomarkera zgromadzonego w próbce frakcji pęcherzykowej, określając jego ilości w poszczególnych fazach wydechu. Ważnym elementem pracy jest analiza porównawcza autorskiego systemu pobierania próbek z rozwiązaniem komercyjnym, opracowanym na Uniwersytecie Medycznym w Insbrucku (BreathSampler). Badania porównawcze ilości izoprenu w próbkach, analiza zgromadzonej objętości III fazy wydechu oraz analiza ilości innych biomarkerów są zwieńczeniem tej części pracy i posiadają ważny aspekt użytkowy. Pozwalają bowiem jednoznacznie stwierdzić, że: amplituda maksimum na charakterystyce widmowej, odpowiadająca obecności izopropenu jest większa niż w próbce zgromadzonej z wykorzystaniem BreathSamplera o ponad 20%, a także, że system pobierania próbek zgromadził mniejszą objętość III fazy o 13%-19% w porównaniu do BreathSamplera.



Autor wyjaśnia także przyczyny takich różnic. Opracowany przez Doktoranta system pobierania próbek umożliwia dokładniejsze niż w przypadku systemu BreathSamplera wyznaczenie początku frakcji pęcherzykowej. Pozwala to na zminimalizowanie niekorzystnego wpływu próbki powietrza z fazy II oraz maksymalizację objętości powietrza z III fazy wydechu. Warto w tym miejscu również zaznaczyć, że oprócz analizy stężenia NO układ opracowany przez Doktoranta pozwala także na wykrywanie innych biomarkerów, np. acetonitrylu oraz acetonu. Odpowiadają one za odrębne jednostki chorobowe. Autor przeprowadził także analizę chromatograficzną wydychanego powietrza, a wyniki tej analizy zamieścił w końcowej części rozdziału szóstego udowadniając, że system pobierania próbek jego autorstwa jest wydajniejszy od stosowanych komercyjnie, ponieważ umożliwia pobranie większych objętości próbek acetonitrylu oraz acetonu. Kończącym etapem badań opisanych w tym rozdziale były prace z wykorzystaniem systemu w warunkach klinicznych z udziałem osób, u których zdiagnozowano choroby układu oddechowego. Badania te prowadzone były w Centrum Medycznym Alpejska w Warszawie. Pomiary wykonywano w ściśle zdefiniowanych i kontrolowanych warunkach (temperatura, ciśnienie). Badania wykazały, że zaprojektowany, wykonany i przetestowany układ pobierania próbek umożliwia określenie stężenia tlenu azotu w wydechu człowieka i wykrycie stanu chorobowego.

Stwierdzam zatem, że założony cel został osiągnięty, a teza udowodniona poprzez opracowanie koncepcji systemu pobierania próbek wydychanego powietrza oraz zaproponowanie metody precyzyjnej separacji faz wydechu, która jednocześnie zapewnia pobranie maksymalnej objętości powietrza wydychanego, przeprowadzenie weryfikacji przyjętej koncepcji oraz walidacja elementów systemu i algorytmów analizy danych, przeprowadzenie badań eksperymentalnych w celu potwierdzenia przyjętych założeń oraz zastosowanie systemu pobierania frakcji pęcherzykowej w warunkach klinicznych.

2. Ocena oryginalności rozprawy i aktualności poruszanej tematyki badawczej

Autor opracował oryginalny system pobierania próbek frakcji pęcherzykowej i dostosował jego parametry do wymagań zdefiniowanych przez czujnik gazu. Do analizy składu powietrza wydychanego zastosował metodę laserowej spektroskopii strat we wnęce optycznej. Nie ulega wątpliwości, że tego rodzaju metoda pomiarowa i kompletny układ pomiarowy przetestowany w warunkach klinicznych są oryginalnym rozwiązaniem autorskim, posiadającym dodatkowo ważne aspekty utylitarne.

Stwierdzam również, że tematyka poruszana przez Doktoranta jest aktualna i należy do stosunkowo nowego obszaru badawczego, będącego przedmiotem prac wielu grup badawczych, prowadzących badania podstawowe w tym zakresie. Praca, oprócz licznych walorów naukowych, posiada również aspekt badawczo-konstrukcyjny bowiem Autor wykonał kompletny system pobierania próbek umożliwiający wydzielenie i gromadzenie powietrza z pęcherzyków płucnych w celu ich dalszej analizy, np. pod kątem stężenia NO. Tlenek azotu odgrywa istotną funkcję w organizmie ludzkim, a badania jego stężenia w powietrzu wydychanym stanowią nie lada wyzwanie dla wielu grup badawczych na całym świecie. W tym miejscu należy również zaznaczyć, że recenzowana praca jest efektem prac badawczych, dotyczących realizacji projektu systemu do wykrywania biomarkerów chorób w wydychanym powietrzu, prowadzonych w Instytucie Optoelektroniki WAT. Doktorant jest członkiem zespołu realizującego te prace, a przedstawiona do recenzji rozprawa jest spójnym opracowaniem dotyczącym projektu i wykonania układu pobierania próbek oraz badań z wykorzystaniem tego układu i analizy uzyskanych danych. Jest to praca kompletna. Dowodzi wiedzy i dyscypliny naukowej Doktoranta, opanowania przez Niego warsztatu badawczego, jak również umiejętności konstrukcyjnych i myślenia analitycznego.

Za najważniejsze osiągnięcia Doktoranta uważam:

1. Zaproponowanie algorytmu wyznaczania początku III fazy wydechu w układzie separacji faz.

2. Zaproponowanie metody minimalizującej zmienność stężenia CO₂ i poprawę dokładności wyznaczenia początku III fazy wydechu.
3. Wykonanie analizy wpływu filtracji cyfrowej SMA na przebieg krzywych kapnograficznych w funkcji czasu w zależności od ilości uśrednianych punktów oraz określenie opóźnień przy wykrywaniu początku III fazy wydechu dla znanej liczby uśrednień krzywych kapnograficznych.
4. Opracowanie autorskiego algorytmu analizującego dynamikę zmian średniej kroczącej dla punktów sąsiadujących do wyznaczania początku III fazy wydechu.
5. Opracowanie modelu matematycznego czujnika CO₂ typu NDIR do analizy wydychanego powietrza (model uwzględnia uwarunkowania wynikające z wykrywania faz wydechu).
6. Weryfikacja zaproponowanej metody wyznaczania przepływu z wykorzystaniem pomiaru różnicy ciśnień.
7. Wyznaczenie funkcji korekcji wskazań stężenia CO₂ i zmniejszenie niepewności względnej wskazań czujnika.
8. Opracowanie i wykonanie systemu pobierania próbek powietrza wydychanego pozwalającego na wydzielenie frakcji pęcherzykowej w sposób niezależny od parametrów tego powietrza.
9. Wykazanie uniwersalności zaproponowanego rozwiązania (wykazanie możliwości zastosowania opracowanego systemu do wykrywania innych biomarkerów, np. acetonitryl, aceton).
10. Dostosowanie systemu do wytycznych Amerykańskiego Towarzystwa Chorób Układu Oddechowego oraz Europejskiego Towarzystwa Oddechowego.
11. Weryfikacja działania opracowanego systemu pobierania próbek w warunkach laboratoryjnych oraz klinicznych i doprowadzenie układu do VII poziomu gotowości technologicznej.

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi jednolitą całość, spójną tematycznie, prowadzącą do opracowania unikalnego mikroprocesorowego systemu pobierania próbek, ważnego narzędzia do badań przesiewowych pod kątem wykrywania chorób, których biomarkerem jest tlenek azotu.

3. Uwagi krytyczne, pytania

Do recenzowanej pracy doktorskiej mjr. mgr. inż. Artura Prokopiuka recenzent zgłasza następujące krytyczne uwagi szczegółowe:

- w opisie równania (4.1), określającego stan gazu rzeczywistego zabrakło wartości i jednostek stałych Avogadra oraz Boltzmanna. Są to wprawdzie wielkości powszechnie znane, ale podanie ich wartości, a w szczególności jednostek pomogłoby w analizie poprawności wyznaczania maksymalnego czasu pomiaru parametrów próbek,
- przy definicji i opisie stałej Loschmidta brakuje jednostek, co utrudnia analizę matematyczną, tym bardziej, że np. w określeniu stężenia ditlenku węgla jednostka jest już podana [liczba cząsteczek/cm³],
- oznaczenie stałej czasowej jako T w tabeli 4.6 jest mylące, zgodnie z równaniem (4.7) oraz jego opisem powinno być τ .
- Autor na stronie 61 stwierdza, że wykonane obliczenia umożliwiły identyfikację podstawowych zjawisk zachodzących w czujniku NDIR. Nie wiemy jednak o jakie zjawiska chodzi? Należałoby to rozwinąć.

Wymienione przeze mnie uwagi krytyczne (głównie redakcyjne) oraz wątpliwości wyrażone w pytaniach poniżej nie wpływają na pozytywną ocenę przedstawionej pracy doktorskiej i nie umniejszają mojej pozytywnej oceny oryginalności rozprawy i aktualności poruszanej tematyki badawczej.

Do opiniowanej pracy doktorskiej mjr. mgr. inż. Artura Prokopiuka recenzent zgłasza następujące pytania:

1. Doktorant w celu dopasowania czasu zadziałania poszczególnych elementów układu separacji faz stosuje medyczne węże silikonowe (rozdział 4.3.1.). Ich długość wpływa jednak na opóźnienie niezbędne dla czasu zadziałania elektrozaworów. Proszę wyjaśnić czy ich długość została wyznaczona, a jeżeli tak to w jaki sposób była ona dobrana?
2. Autor w rozdziale 4.4.4 określił kryteria wyboru głównych parametrów czujników temperatury definiując optymalny zakres pomiaru temperatury zawierający się w granicach od 20°C do 36°C. Skąd wynika tak szeroki zakres i czy wybór tych wartości poparty jest badaniami lub obliczeniami?
3. Proszę wyjaśnić zjawisko gwałtownych zmian amplitudy na charakterystyce widmowej sygnału stężenia CO₂ po zastosowaniu metody SMAA (rysunek 4.25, strona 74). Autor wspomina, że przyczyną jest charakter sygnału, wymaga to jednak krótkiego komentarza.
4. Przedstawione w rozdziale 5.2.1 wyniki pomiarów temperatury elementów układu dystrybucji powietrza wykonywane były w komorze termostatowanej UF30 (Memmert GmbH + Co. KG). Ponieważ komora taka jako czujniki temperatury wykorzystuje Pt100 to nasuwa się pytanie czy zapewniono odpowiednią kalibrację i weryfikację poprawności pomiaru czujników Pt100? Czy w czasie prowadzenia badań wystąpiła konieczność korekty elementów układu pomiarowego (czujniki ciśnienia i przepływu)?
5. Czy badany był wpływ spożywanych bądź używanych substancji na wynik pomiaru? W badaniach powietrza wydechowego spotyka się zasady określające, że np. kilka godzin przed przystąpieniem do pomiaru pacjent powinien powstrzymać się od spożywania posiłków, palenia papierosów, mycia zębów, intensywnego wysiłku fizycznego itp. Czy Autor widzi możliwość i konieczność wprowadzenia tego typu obostrzeń?
6. Czy oprócz powietrza z jamy ustnej można byłoby analizować powietrze nosowe? Stwarzałoby to możliwość, aby oprócz astmy wykonywać np. detekcję nieżyty nosa.
7. Czy Autor spotkał się z wynikami badań, które wskazują, że na wynik pomiaru NO wpływa również zapalenie przełyku (stan zapalny przełyku)?
8. Opracowany przez Autora system spełnia wiele kluczowych wymagań stawianych układom do analizy wydychanego powietrza, m.in. niska granica wykrywalności, wysoka czułość, duża powtarzalność pomiaru, szeroki zakres dynamiczny i krótki czas odpowiedzi. Czy Autor mógłby skomentować zdolność do detekcji NO spośród innych obecnych w próbce (chodzi o selektywność i tolerancję na zmienne tło chemiczne)?
9. Czy Autor rozważał wyznaczenie tzw. stabilności długoczasowej systemu? (czujniki mogą ulegać zatrucaniu wskutek ekspozycji na np. związki siarki przy dużej wilgotności, wykluczając go z użytkowania).
10. Badanie stężenia NO w powietrzu wydychanym u chorych na sezonowy alergiczny nieżyt nosa jest przydatną metodą nieinwazyjnej oceny procesu zapalnego dolnych dróg oddechowych. Czy ta jednostka chorobowa nie wpłynie na wyniki pomiarów NO? Jeżeli tak, to przed pomiarami należałoby wykonywać odpowiednią preselekcję osób tak, aby badaniami objęte były osoby, u których nie zdiagnozowano np. tego typu alergii.

Pytania 5-7,10 należałoby raczej skierować do osób z wykształceniem medycznym, nie wymagają bezpośredniej odpowiedzi Doktoranta, są raczej zasygnalizowaniem kwestii, które warto rozważyć w przyszłych pracach.

4. Ocena analizy źródeł

Recenzowana praca powstała w wyniku badań prowadzonych w Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie oraz w Centrum Medycznym Alpejska w Warszawie.

Z tematyką rozprawy powiązanych jest 6 publikacji autorstwa lub współautorstwa mjr. mgr. inż. Artura Prokopiuka.

Analiza źródeł literaturowych obejmuje łącznie 239 pozycji. W przypadku 6 pozycji mjr. mgr. inż. Artur Prokopiuk występuje jako współautor, natomiast w 1 pracy występuje jako jedyny autor.

Cytowane artykuły dotyczą głównie zagadnień związanych z algorytmami, metodami i systemami pomiaru powietrza wydychanego. Znaczna część cytowanych przez Autora artykułów opublikowanych zostało po roku 2015. Kluczowe pozycje opublikowane były w latach 2017-2020. Stwierdzam, że tematyka poruszana przez doktoranta jest aktualna, literatura cytowana jest w sposób prawidłowy, a jej zakres wiąże się ściśle z tematyką pracy.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone przez Doktoranta badania potwierdziły możliwość wykonywania korekcji wskazań czujnika CO₂ oraz jej zastosowania w systemie dedykowanym do pobierania próbek powietrza wydychanego. Autor zaproponował algorytm analizy kształtu charakterystyki zmian stężenia CO₂ metodą dSMAA/dt w wyniku czego wykazał możliwość maksymalizacji objętości frakcji pęcherzykowej pobranej z powietrza wydychanego. Prowadzone przez Niego badania i opracowany system pobierania próbek mają ogromne znaczenie użytkowe. Pozwalają na bezinwazyjną diagnostykę kliniczną np. w badaniach przesiewowych pacjentów, kontrolę stanu ich choroby oraz ocenę oddziaływania środowiska na ich organizm.

Reasumując stwierdzam, że rozprawa doktorska mjr. mgr. inż. Artura Prokopiuka „*Mikroprocesorowy system pobierania próbek frakcji pęcherzykowej do analizatorów powietrza wydychanego przez człowieka*” spełnia ustawowe wymogi stawiane pracom doktorskim w odniesieniu do oryginalności problemu naukowego, umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wiedzy teoretycznej. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mjr. mgr. inż. Artura Prokopiuka do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

