

3 stycznia 2023 r.

prof. dr hab. inż. Paweł Strumiłło
Instytut Elektroniki
Politechniki Łódzkiej

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

Wpłynęło dnia.....20.01.2023
Zarejestrowano pod nr
Podpis JM

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY DYSCYPLINY NAUKOWEJ AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA
I ELEKTROTECHNIKA W AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ

Tytuł rozprawy: System zdalnej diagnostyki bezdechu sennego w warunkach domowych

Autor rozprawy: mgr inż. Jakub Drzazga

Promotor: prof. dr hab. inż. Bogusław Cyganek

I. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Obturacyjny bezdech senny (OBS) jest objawem zaburzeń snu. Szacuje się, że na OBS chorować może ponad 20% mężczyzn i ok. 10% kobiet. Choroba ta często nie jest prawidłowo diagnozowana. Jej zauważalnym skutkiem jest m.in. senność w ciągu dnia i utrata koncentracji. Konsekwencją nieleczzonego OBS mogą być choroby metaboliczne, nadciśnienie, choroby serca, ryzyko udaru mózgu czy też zaburzenia psychiczne. Jest to zatem ważny problem zdrowotny i społeczny. Podstawowym badaniem stosowanym w diagnozowaniu OBS jest polisomnografia, czyli nadzorowane, wielogodzinne monitorowanie snu polegające na rejestracji wielu parametrów życiowych pacjenta. Jest to badanie drogie wykonywane tylko w specjalistycznych placówkach medycznych. Niniejsza problematyka badań została dostatecznie jasno sformułowana przez Autora we wstępnej części rozprawy.

W przełożonej do recenzji pracy podjęto zadanie budowy i zbadania systemu do zdalnej diagnostyki bezdechu sennego. Sformułowano następujące tezy rozprawy:

1. *Możliwe jest stworzenie systemu poligraficznego, który umożliwi diagnostykę bezdechu sennego oraz zdalne przesyłanie danych w warunkach domowych.*
2. *Możliwe jest stworzenie algorytmu uczenia maszynowego, który na podstawie danych z przenośnego urządzenia do diagnostyki bezdechu sennego umożliwi wykrywanie zaburzeń oddechowych oraz ich klasyfikację na bezdech senny i sptyczenie oddechu.*
3. *Silikon przewodzący jako rezystancyjny czujnik odkształcenia może zostać wykorzystany do pomiaru wysiłku oddechowego w przenośnym urządzeniu do domowej diagnostyki bezdechu sennego.*

Rozprawa ma charakter konstrukcyjno-doświadczalny. Tezy pracy zostały wykazane na drodze budowy systemu i weryfikacji jego działania w badaniach bezdechu sennego na podstawie zapisów z baz danych z repozytoriów sygnałów biomedycznych oraz obejmujących eksperyment medyczny z udziałem stu osób.

II. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy, świadczący o dostatecznej wiedzy autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

W przeglądowym rozdziale 2. rozprawy pt. Bezdech senny i jego diagnostyka Autor scharakteryzował zaburzenia oddechowe występujące podczas snu. Omówił objawy bezdechu sennego, który definiuje się jako zespół objawów chorobowych związanych z okresowymi bezdechami i występującymi podczas snu. Podał podstawowe parametry wykorzystywane w diagnozie tego zespołu chorobowego. Zaznaczył, że tzw. złotym standardem w diagnostyce bezdechu sennego jest polisomnografia. Jest to całonocne badanie nadzorowane przez personel medyczny, podczas którego jest rejestrowanych kilkanaście parametrów życiowych pacjenta, m.in. sygnały EKG, EEG, EMG, EOG, częstość oddechów i saturacja krwi tlenem. Znacznie mniej kosztownym i łatwiejszym do przeprowadzenia jest tzw. badanie poligraficzne, które jest badaniem nienadzorowanym, w którym typowo mierzy się dwa sygnały oddechowe, nasycenie krwi tlenem oraz sygnał elektrokardiograficzny. Jak zaznacza Autor jest to zestaw sygnałów wystarczający do postawienia diagnozy lub skierowanie pacjenta na dalsze badania.

W drugiej części rozdziału 2. opisano system do diagnostyki bezdechu sennego Comarch PulmoVest, który został zaprojektowany przez Autora rozprawy jako rozwinięcie istniejącego urządzenia Comarch CardioVest, służącego do długoterminowej rejestracji sygnału elektrokardiograficznego. System PulmoVest składa się rozciągliwego pasa z elektrodami EKG, rejestratora sygnałów, sondy pulsoksymetru, kaniuli nosowej oraz stacji dokującej wraz z zasilaczem. System umożliwia rejestrację następujących parametrów i sygnałów: EKG, wysiętek oddechowy, przepływ powietrza, wysycenie tlenem hemoglobiny (SpO₂), zmian pozycji ciała i sygnał akustyczny chrapania. Wartościową cechą systemu jest możliwość bezprzewodowego przesłania wyników badania na zdalny serwer, którego zasoby są udostępnione personelowi medycznemu.

W rozdziale 2. rozprawy, który w zamierzeniu Autora, jest wprowadzeniem do problematyki bezdechu sennego i jego diagnostyki nie zamieszczono właściwego przeglądu literatury tematu. W tematyce tej opublikowano wiele prac badawczych, w których są opisywane innowacyjne systemy do monitorowania bezdechu sennego (m.in. z zastosowaniem metod bezkontaktowych). Krótka kwerenda dla hasła *apnea* w czasopiśmie *Sensors* (m.in. w którym Autor rozprawy opublikował wyniki swoich badań) udostępnia kilkadziesiąt prac w poświęconych tej tematyce. Szereg z tych prac dotyczy zastosowania metod uczenia maszynowego do wykrywania bezdechu sennego, a których Autor rozprawy nie cytuje. W wykazie literatury rozprawy doszukałem się tylko 3 pozycji literatury [2, 73 i 79], odnoszących się do zastosowania metod uczenia maszynowego do wykrywania bezdechu sennego. Szczegółnej uwadze Autora rozprawy polecam przeglądową pracę pt.:

Mostafa, S.S.; Mendonça, F.; G. Ravelo-García, A.; Morgado-Dias, F. A Systematic Review of Detecting Sleep Apnea Using Deep Learning. *Sensors* 2019, 19, 4934. <https://doi.org/10.3390/s19224934>

Przypuszczam, że w innych czasopismach wydawnictw takich jak Springer, Elsevier, czy IEEE publikacji poświęconej tematyce rozprawy jest znacznie więcej.

III. Czy autor rozwiązał poprawnie postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Zgodnie z postawionymi hipotezami badawczymi Autor rozprawy podjął się rozwiązania następujących zadań badawczych:

Ad.1. *Projekt i wykonanie poligrafu z możliwością zdalnego przesyłania danych*

Zbudowano urządzenie o małych rozmiarach i wadze, które pełni dwie podstawowe funkcje: rejestrację sygnałów oraz przesyłanie zapisanych sygnałów do stacji dokującej. Działaniem urządzenia zarządza mikrokontroler (nie podano rodzaju mikrokontrolera). Urządzenie jest wyposażone w układy elektroniczne (termistor, czujnik optyczny, pas rezystancyjny, akcelerometr, mikrofon, elektrody EKG) do rejestracji odpowiednio siedmiu następujących parametrów: przepływu powietrza, nasycenia krwi tlenem, wysiłku oddechowego, pozycji ciała, sygnału akustycznego chrapania i sygnału EKG. Całość urządzenia została zaprojektowana i wykonana przez Autora rozprawy. W szczególności konstrukcja pasa transmisyjnego do pomiaru wysiłku oddechowego jest nowatorska i jest objęta ochroną patentową na terytorium Rzeczypospolitej Polskiej (Pat.239483, UPRP).

Ad. 2. *Projekt i wykonanie układu kondycjonowania sygnału z rezystancyjnego czujnika odkształcenia do pomiaru wysiłku oddechowego wraz z jego walidacją podczas rzeczywistych badań snu.*

Do pomiaru wysiłku oddechowego zastosowano silikon przewodzący, który zmienia swoją rezystancję przy odkształceniu. Podczas pomiaru rezystancji tego układu występuje duża wartość napięcia niezrównoważenia (offsetu), które dodaje się sygnału użytecznego o niewielkiej zmienności amplitudy. Autor zaproponował oryginalny układ elektroniczny, składający się z dwóch kaskadowo połączonych precyzyjnych wzmacniaczy operacyjnych (Analog Devices TLC 2050) z filtrami RC w torze sygnałowym, wyznaczający napięcie offsetu na wyjściu drugiego wzmacniacza, które jest następnie wprowadzane na wejście pierwszego wzmacniacza. Na podstawie pomiarów testowych pokazano skuteczność działania tego układu w usuwaniu zmieniającej się wartości napięcia offsetu (np. przy zmianie ułożenia ciała pacjenta). Poddano też dyskusji dobór parametrów zaprojektowanego układu, co pokazuje prawidłowe podejście projektowe Autora rozprawy do budowania układów elektronicznych.

Ad. 3. *Opracowanie algorytmu uczenia maszynowego wykrywającego epizody zaburzeń oddechowych oraz klasyfikującego je na bezdech senny i spłylenie oddechu.*

W pracy zaprojektowano i zweryfikowano kilka wariantów algorytmów uczenia maszynowego, do oznaczania epizodów bezdechu sennego i ich rozróżniania na bezdech i spłylenie oddechu. W celu opracowania takich algorytmów Autor rozprawy wykorzystał ogólnodostępne bazy danych sygnałów biomedycznych: SHHS (ang. *Sleep Heart Health Study*) oraz *St. Vincent's University Hospital / University College Dublin sleep apnea database* z repozytorium *PhysioNet*. Pierwsza z tych baz posłużyła do trenowania klasyfikatorów a druga to ich testowania. Autor zbudował również własną bazę danych sygnałów medycznych zebranych od 100 osób. Na badania te uzyskano zgodę Komisji Bioetycznej przy Okręgowej Izbie Lekarskiej w Krakowie. W eksperymencie medycznym wykonano rejestracje sygnałów za pomocą urządzenia wykonanego

przez Autora rozprawy oraz za pomocą urządzenia Alice NightOne firmy Philips, które posłużyło jako urządzenie referencyjne.

W zaproponowanym algorytmie do wykrywania bezdechu sennego wykorzystano następujące sygnały: przepływ powietrza przez górne drogi oddechowe oraz wysiłek oddechowy klatki piersiowej i brzucha. Jako klasyfikator sygnałów zastosowano dwie sieci o architekturze LSTM (ang. *long short-term memory*) pracujące w układzie kaskadowym, tj. wyjścia pierwszej sieci stanowią wejścia do sieci drugiej. Dla zbioru testowego z bazy *PhysioNet* bezdech senny wykrywano z dokładnością (dla różnych instancji testów) w zakresie od 68,7% do 71% i z czułością (jak wyznaczono z Tabeli 24.) 69%. Wyznaczono również miary statystyczne dla współczynników REI (ang. *respiratory event index*), HI (ang. *hypopnea index*) oraz AI (ang. *apnea index*) o wartościach zgodności z anotacjami lekarzy specjalistów odpowiednio dla współczynnika korelacji Pearsona 0,88, 0,74 i 0,96. Można uznać te wyniki za bardzo dobre. Autor jednak nie porównał ich do wyników uzyskiwanych w innych pracach.

Autor podjął też badania polegające na zastosowaniu architektury sieci typu Transformer do wykrywania bezdechu sennego, zbadał m.in. połączenie hybrydowe sieci LSTM i sieci typu Transformer. Pomimo dobrania specjalnej architektury tej sieci nie uzyskano poprawy skuteczności wykrywania bezdechu sennego czy zgodności wskaźnika AHI (ang. *apnea-hypopnea index*). Jest to również wartościowym wnioskiem z badań, który Autor poddał merytorycznej dyskusji.

Ad. 4. *Weryfikacja zaproponowanych rozwiązań poprzez poligraficzne badanie porównawcze z urządzeniem dostępnym komercyjnie, przeprowadzone na grupie stu osób.*

Opracowane algorytmy i zbudowane przez Autora urządzenie do wykrywania zaburzeń oddechu porównano z komercyjnie dostępnym urządzeniem poligraficznym (typu III) Alice NightOne firmy Philips jako urządzeniem referencyjnym. W tym celu przeprowadzono eksperyment medyczny obejmujący 100 osób, u których przeprowadzono jednoczesną rejestrację parametrów życiowych podczas snu za pomocą obydwu urządzeń. Porównanie działanie urządzeń przeprowadzono na podstawie wartości wyznaczonych wskaźników AHI, OAI (ang. *obstructive apnea index*), HI oraz CAI (ang. *central apnea index*). Stwierdzono, że wskaźniki AHI, OAI i HI przyjmują większe wartości dla urządzenia Alice NightOne. Autor poddał dyskusji uzyskanie wyniki i wyjaśnił powstałe rozbieżności wynikające głównie z innych zastosowanych czujników do pomiaru przepływu powietrza (kaniula ciśnieniowa w przypadku urządzenia Alice NightOne i kaniula z termistorem w przypadku urządzenia autorskiego). Z kolei dla wskaźnika CAI (liczba epizodów bezdechu ośrodkowego) urządzenie autorskie wykazało większą liczbę tych epizodów. Walidacji poddano również algorytmy do automatycznego wykrywania i klasyfikacji zaburzenia oddechu dla danych zebranych podczas eksperymentu medycznego. Uzyskane dokładności wykrywania zaburzeń oddechowych (bezdechu i sptyczenia oddechu) były podobne jak dla danych z baz SHHS i PhysioNet. Autor rozszerzył pomiar o parametr SpO₂. Uzyskał poprawę dokładności wykrywania zaburzeń do wartości 0,7 dla bezdechu i 0,72 dla sptyconego oddechu oraz poprawę dokładności estymacji parametru AHI. Wyniki te Autor poddał szerokiej dyskusji uwzględniającej pomiar parametrów życiowych przez zastosowane czujniki.

IV. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Oryginalny dorobek Autor można podsumować w dwóch obszarach:

1. W zakresie elektronicznych rozwiązań konstrukcyjnych to: zbudowanie czujnika wysiłku oddechowego w postaci pasa rezystancyjnego oraz opracowanie analogowego układu elektronicznego do rejestracji i przetwarzania sygnałów biomedycznych, w tym układu elektronicznego do usuwania offsetu napięcia.
2. W zakresie analizy sygnałów i ich klasyfikacji to: zastosowanie i walidacja architektur sieci do uczenia maszynowego (sieci LSTM i typu Transformer) do wykrywania epizodów zaburzenia oddechu (z podziałem na bezdech i spłylenie oddechu).

Osiągnięcia te należy uznać za oryginalny wkład do dyscypliny naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika w zakresie budowy urządzeń do diagnostyki medycznej. Autor zastosował zarówno nowoczesne podzespoły elektroniczne, wykazał się inwencją w budowie układów elektronicznych, ale również wykorzystał najnowsze osiągnięcia w zakresie architektur uczenia maszynowego oraz pokazał umiejętności ich skutecznej implementacji. Jak zaznaczono w II sekcji recenzji bardzo skromny jest przegląd literatury światowej w tematyce rozprawy. Zatem porównanie osiągnięć naukowych Autora na tle literatury światowej jest utrudnione. Wypada natomiast pozytywnie porównanie wyników badań Autor w odniesieniu do poziomu techniki. Na podstawie przeprowadzonego eksperymentu medycznego można jednoznacznie stwierdzić o bardzo dobrym wyniku porównania opracowanego przez Autora urządzenia do jednego z najnowszych urządzeń poligraficznych dostępnych na rynku.

V. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego przedstawienia uzyskanych wyników i ich interpretacji (zwięzłość, jasność)?

Autor opisał swoje osiągnięcia badawcze na odpowiednim poziomie szczegółowości stawiany rozprawom doktorskim. Przeprowadził również szeroką dyskusję uzyskanych wyników. Wiele do życzenia pozostawia natomiast styl języka, którym posługuje się Autor. Tekst zawiera wiele określeń żargonowych i potocznych, które nie powinny być używane w pracy naukowej. Konkretniejsze uwagi do tego aspektu pracy zamieściłem w sekcji VI. niniejszej recenzji.

VI. Jakie są słabe strony rozprawy i ewentualnie jej główne wady?

Moje główne uwagi do słabych stron rozprawy dotyczą sposobu prezentacji materiału badawczego a nie zawartości merytorycznej osiągnięć badawczych Autora.

Pierwsza uwaga odnosi się do tytułu rozprawy. Zamiast tytułu rozprawy:

System zdalnej diagnostyki bezdechu sennego w warunkach domowych

tytuł rozprawy, który mógłby lepiej ujmować przedmiot rozprawy mógłby brzmieć:

Telemedyczny system wykrywania zaburzeń oddechu podczas snu

Po pierwsze, system nie służy do diagnostyki, tylko wspomaganie diagnostyki, gdyż nie dokonuje diagnozy ew. stanu chorobowego pacjenta, a służy do wykrywania epizodów zaburzeń oddechu

podczas snu i wyznaczania wskaźników tych zaburzeń. Po drugie, system umożliwia wykrywanie również stanów spłycaenia oddechu a nie tylko bezdechu, zatem watro zapisać ogólniej, że służy do ... *wykrywaniu zaburzeń oddechu*. Po trzecie, w pracy nie przeprowadzono dyskusji nt. warunków domowych, np. szczególnych warunkach klimatycznych, w których system ma pracować; przebywanie pacjenta w miejscu zamieszkania nie jest warunkiem działania systemu.

Autor sformułował trzy tezy rozprawy. W moim przekonaniu teza pierwsza, której mowa o systemie, który ... *umożliwi diagnostykę bezdechu* sennego jest na wyrost. Autor nie zbudował systemu do diagnostyki bezdechu a system do wykrywania bezdechu i wyznaczania wskaźników charakteryzujących zabrudzenia oddechowe. Uważam, z kolei, że 2. teza rozprawy w dużym stopniu pokrywa się z tezą pierwszą. Proponuję dwie pierwsze tezy połączyć w jedną. Również sugeruję zastąpienie słowa *stworzenie* słowem *opracowanie* występującego w tych tezach.

W prezentacji wyników Autor wielokrotnie posługuje się tablicami pomyłek oraz podaje dokładność wykrywania epizodów zaburzeń oddychania. Warto, aby Autor stosował również takie miary jak czułość, specyficzność (swoistość) oraz dodatnia i ujemna wartość prognostyczna. W szczególności istotna jest miara czułości informująca o procencie skutecznych wykryć zaburzeń oddechu występujących podczas snu.

Za podstawową wadę rozprawy uważam sposób opisu osiągnięć Autora. Tekst pracy zawiera bardzo wiele określeń żargonowych i uproszczeń, które nie powinny znaleźć się w pracy o charakterze naukowym. Przykładowe fragmenty rozprawy (tylko z pierwszej części pracy), w którym zastosowano wiele nieodpowiednich sformułowań zamieściłem poniżej (niektóre z dodatkowymi uwagami):

Str. 7: ...*ciężkości choroby*

Str. 16: *Rejestrując sygnały jest zamocowane wraz z pasem na ciele pacjenta, natomiast podczas zgrywania danych leży na stacji dokującej.*

Str. 18: *Niski koszt jednostkowy materiałów sprawia, że kaniula taka może być jednorazowa, dzięki czemu eliminuje się konieczność dezynfekcji tego elementu pomiędzy pacjentami.*

Str. 21: *Wartość składowej stałej przyspieszenia wzdłuż osi prostopadłych do osi ciała pacjenta pozwala na wyznaczenie kierunku i zwrotu wektora przyspieszenia ziemskiego w czasie, gdy pacjent leży. (co to jest oś ciała pacjenta?)*

Str. 21: *Częstotliwość próbkowania 8kHz wykorzystana w projekcie służy jedynie zbudowaniu bazy pomiarów do rozwoju algorytmów automatycznych. Docelowo zostanie ona zmniejszona ze względu na redukcję ilości danych oraz ochronę prywatności pacjentów.*

Str. 21: *Wykorzystano scalony frontend dedykowany do pomiaru EKG, komunikujący się z mikrokontrolerem za pomocą magistrali SPI (serial peripheral interface). Pomimo występowania czterech elektrod medycznie jest to pomiar jednodoprowadzeniowy.*

Str. 23: *opartych o rezystory kontrolowane napięciem*

Str. 24: *Najprostszym sposobem na wycięcie niepożądaney składowey stałej z otrzymanego sygnału jest zastosowanie sprzętowego filtra górnoprzepustowego.*

Str. 24: *Z powodu tych ograniczeń zastosowano nowy układ pomiarowy wyznaczający on wartość składowey stałej i wykorzystujący ją w pętli sprzężenia zwrotnego do stłumienia offsetu.*

Str.: 24: *Rys. 11 Schemat układu obsługującego rezystancyjny czujnik wysiłku oddechowego*

Str. 24: *... który tworzy sygnał sprzężenia zwrotnego podawany z powrotem na ujemną gałąź pierwszego wzmacniacza.*

Str. 25: *Normalny oddech mieści się w zakresie $\pm 10\Omega$.*

str. 37: *Zabieg ten sprowadza amplitudę sygnałów mniej więcej do zakresu (-1,1).*

Wniosek końcowy

Pomimo zaledwie dostatecznego sposobu opisu niewątpliwych osiągnięć badawczych Autora w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika, do której wniósł oryginalny wkład badawczy stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska spełnia wymagania Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym z 14 marca 2003 roku, Dziennik Ustaw Nr 65, poz. 595 z późn. zm. oraz Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora. Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Drzazgi do publicznej obrony.



