



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO TECHNICZNYCH
DYSCYPLINA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I ELEKTROTECHNIKA

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

System zdalnej diagnostyki bezdechu sennego
w warunkach domowych

Autor: mgr inż. Jakub Bogdan Drzazga

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Bogusław Cyganek

Praca wykonana: Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
w Krakowie
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Instytut Elektroniki

Kraków, 2022

1. Wstęp

Bezdech senny to choroba polegająca na całkowitym lub częściowym ograniczeniu przepływu powietrza przez górne drogi oddechowe podczas snu. Szacuje się, że problem ten może dotyczyć nawet kilkudziesięciu procent społeczeństwa [1]. Najczęściej dotyka on osób z nadwagą, nietypową budową górnych dróg oddechowych, problemami z ciśnieniem krwi lub nasyceniem krwi tlenem, a także starszych mężczyzn [2]–[5]. Skuteczne leczenie tej choroby wymaga wykonania diagnostyki, podczas której wyznacza się liczbę i rodzaj zaburzeń oddychania w czasie snu. Wartość ta służy następnie do wyliczenia indeksu bezdechów i sptyceń oddechu – AHI (apnea - hypopnea index) [6]. Do przeprowadzenia takiego badania standardowo wykorzystuje się polisomnograf, czyli urządzenie rejestrujące komplet sygnałów życiowych pacjenta istotnych dla diagnostyki zaburzeń snu. Badanie to odbywa się w placówce medycznej pod nadzorem personelu medycznego. Ze względu na wysokie koszty i niską dostępność dopuszcza się diagnozowanie bezdechu sennego z wykorzystaniem zapisów nienadzorowanych wykonanych przy użyciu prostszych urządzeń zwanych poligrafami. Posiadają one ograniczony zestaw kanałów pomiarowych, dedykowany do wykrywania tej jednostki chorobowej [6]. Jednym z głównych celów stosowania poligrafów zamiast pełnej polisomnografii jest zwiększenie liczby wykonywanych badań i tym samym poprawa dostępności diagnostyki i leczenia przy ograniczonej liczbie urządzeń i specjalistów.

Poligrafy dostępne na rynku umożliwiają zwiększenie liczby badanych osób i przeniesienie diagnostyki do domu pacjenta. Posiadają one jednak ograniczenia takie jak brak możliwości zdalnego przesyłania badań czy konieczność czasochłonnego zakładania wielu czujników przez pacjenta. Celem pracy jest opracowanie urządzenia do poligrafii domowej zawierającego rozwiązania dotychczasowych problemów, między innymi w postaci nowatorskiego sposobu pomiaru wysiłku oddechowego oraz oryginalnej metody detekcji i klasyfikacji zaburzeń oddechowych. Ważną cechą omawianej architektury jest zdalne przesyłanie kompletnych zapisów, co wyróżnia ją na tle konkurencji. Istotnym elementem rozważań jest również wskazanie możliwych dalszych ulepszeń i kierunków rozwoju urządzeń tego typu.

2. Tezy i zakres pracy

Praca doktorska była wykonywana w trybie wdrożeniowym, we współpracy z firmą Comarch S.A. Tematyka badawcza dotyczyła domowej diagnostyki bezdechu sennego, a w szczególności problemów występujących przy użyciu pasów rezystancyjnych, możliwości rozróżniania zaburzeń oddechu przez algorytmy uczenia maszynowego oraz kwestii użytkowych specyficznych dla diagnostyki zdalnej. Zakres pracy obejmuje zaprojektowanie, wykonanie i przetestowanie systemu do zdalnej domowej diagnostyki bezdechu sennego, nazwanego Comarch PulmoVest.

Tezy pracy:

- Możliwe jest stworzenie systemu poligraficznego, który umożliwi diagnostykę bezdechu sennego oraz zdalne przesyłanie danych w warunkach domowych.
- 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 i sptyczenie oddechu.
- Silikon przewodzący jako rezystancyjny czujnik odkształcenia może zostać wykorzystany do pomiaru wysiłku oddechowego w przenośnym urządzeniu do domowej diagnostyki bezdechu sennego.

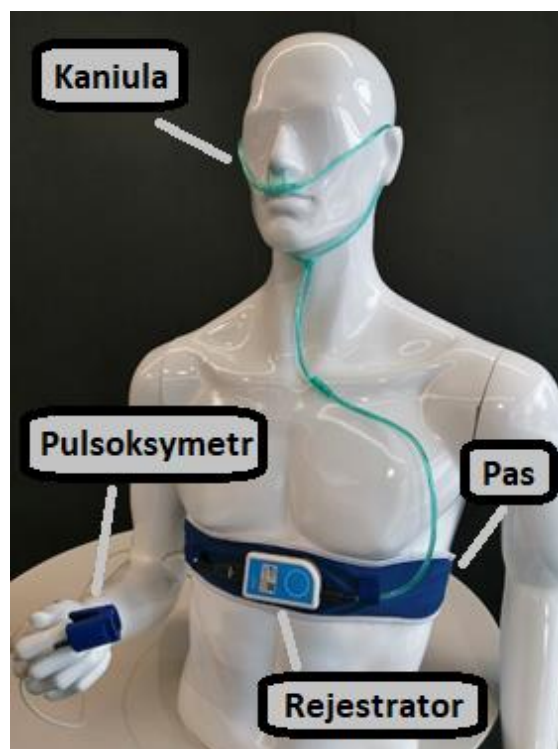
W nawiązaniu do postawionych tez zaproponowany został układ kondycjonowania sygnału z rezystancyjnego czujnika odkształcenia do rejestracji wysiłku oddechowego. Opracowano także nowatorskie metody automatycznego oznaczania zaburzeń korzystające z uczenia maszynowego. Wszystkie opracowane elementy weszły w skład urządzenia Comarch PulmoVest, którego działanie zostało zweryfikowane w toku eksperymentu medycznego obejmującego sto osób.

3. Najważniejsze wyniki pracy

Praca łączy kilka zagadnień wykorzystanych w tematyce wykrywania zaburzeń oddychania w czasie snu: projektowanie układów elektronicznych oraz analizę i klasyfikację sygnałów z wykorzystaniem uczenia maszynowego. Główne osiągnięcia oraz wyniki naukowe otrzymane podczas realizacji doktoratu przedstawiono poniżej.

3.1. Projekt poligrafu do zdalnej domowej diagnostyki bezdechu sennego

Diagnostyka bezdechu sennego wymaga wykorzystania urządzeń, które rejestrują określone sygnały życiowe pacjenta podczas snu – są to poligrafy. W przypadku badań domowych są one udostępniane pacjentom, którzy wykonują pomiar samodzielnie. W tym procesie istotna jest jakość uzyskiwanych zapisów oraz czas potrzebny na przekazanie badań do opisu lekarskiego. System wykorzystywany do uzyskiwania danych może być również wykorzystany do wspierania diagnostyki poprzez algorytmy sztucznej inteligencji. Dzięki wstępnej analizie danych mogą one ułatwiać pracę lekarzowi, który jednak ma pełną swobodę w edycji proponowanych opisów. W pracy opisano projekt systemu rejestrującego sygnały niezbędne do diagnostyki bezdechu sennego, który kładzie szczególny nacisk na łatwość użycia, niezawodność pomiaru oraz zdalne przesyłanie wykonanych badań. Jego istotnym elementem jest algorytm oznaczający zaburzenia oddechowe. Prezentowany system stanowi rozwinięcie istniejącego urządzenia do rejestracji EKG i został zaprojektowany, wykonany i przetestowany w ramach opisywanej pracy. Jego wygląd w konfiguracji umożliwiającej rejestrację przedstawia Rys. 1.

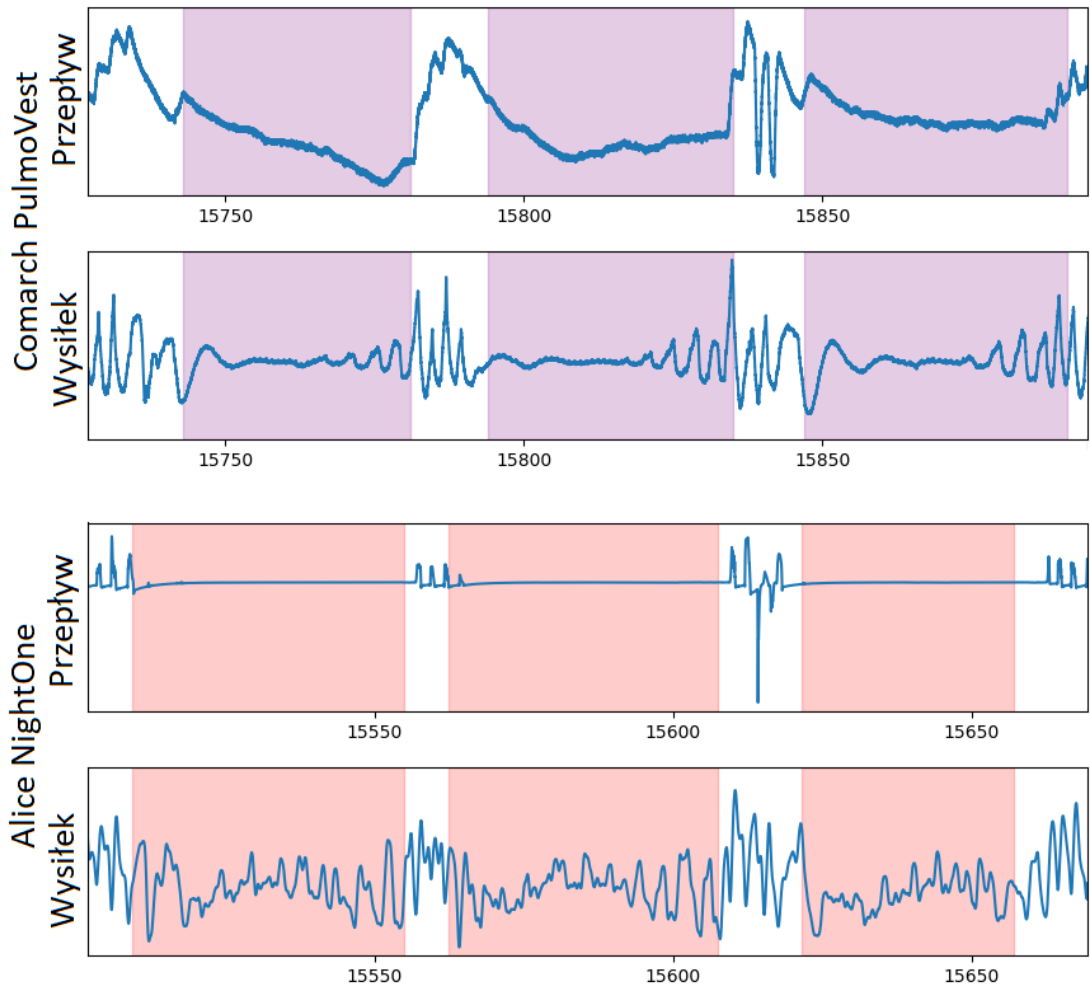


Rys. 1 Comarch PulmoVest gotowy do rejestracji sygnałów życiowych koniecznych do diagnostyki bezdechu sennego

Urządzenie zakładane przez pacjenta składa się z pasa, rejestratora, kaniuli nosowej i pulsoksymetru. Dodatkowo w zestawie znajduje się jeszcze stacja dokująca wraz z zasilaczem odpowiedzialna za ładowanie wbudowanego akumulatora oraz zdalne przesyłanie danych. Szczegółowy opis systemu znajduje się w rozdziale 2.3 pracy, skąd pochodzi również Rys. 1.

3.2. Projekt elektronicznego układu pomiarowego wykorzystującego rezystancyjny czujnik odkształcenia do rejestracji wysiłku oddechowego

Jednym z kanałów pomiarowych wymaganych do diagnozowania bezdechu sennego jest wysiłek oddechowy. Reprezentuje on pracę mięśni oddechowych pacjenta i pozwala rozróżnić trzy typy zaburzeń: obturacyjne, ośrodkowe i mieszane [6]. W pracy zaproponowano użycie silikonu przewodzącego wraz z dedykowanym elektronicznym układem pomiarowym jako rezystancyjnego czujnika odkształcenia do wykonywania tego pomiaru. Pozwala on efektywnie uporać się z główną trudnością występującą w tej konfiguracji jaką jest obecność w sygnale dużej składowej stałej, która może być inna dla różnych fragmentów zapisu. Zaprojektowany układ kompensuje tę składową umożliwiając osiągnięcie większego wzmocnienia sygnału oddechowego jednocześnie sprawiając, że mierzone napięcie pozostaje w dopuszczalnym zakresie pomiarowym przetwornika analogowo – cyfrowego. W przeciwieństwie do dotychczas stosowanych układów składowa stała nie jest zupełnie usuwana z sygnału – jej wzmocnienie jest jednak dużo mniejsze, dzięki czemu możliwe jest obliczenie odkształcenia czujnika w stanie spoczynku (bez oddechu) na podstawie tego samego sygnału. Układ ten stanowi nowatorski wkład w rozwój biomedycznych urządzeń pomiarowych, ponieważ podobne rozwiązania nie były dotychczas stosowane w diagnostyce bezdechu sennego. Prosta konstrukcja układu pomiarowego wykorzystująca standardowe elementy umożliwia zastosowanie go wszędzie tam, gdzie pożądane jest tłumienie niskich częstotliwości bez ich zupełnego usuwania. Szczegółowy opis projektu znajduje się w rozdziale 3.3 dysertacji. Rys. 2 przedstawia fragment sygnału zarejestrowany przez zaprojektowany układ w toku eksperymentu medycznego oraz jego porównanie z zapisem uzyskanym z urządzenia dostępnego komercyjnie.

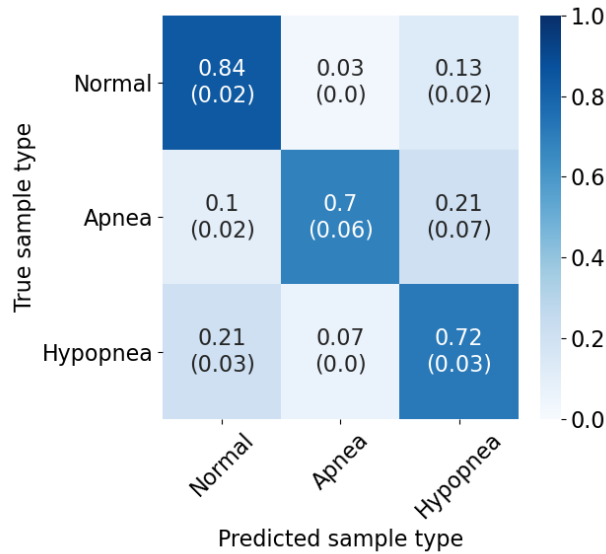


Rys. 2 Sygnały oddechowe zapisane równoległe przez dwa urządzenia. Wysiętek oddechowy Comarch PulmoVest został zarejestrowany przez pas rezystancyjny z nowatorskim układem elektronicznym, wysiętek oddechowy Alice NightOne przez pas RIP (respiratory inductance plethysmography). Na czerwono epizody bezdechu sklasyfikowane jako obturacyjne a na fioletowo mieszane.

Widoczne różnice w zachowaniu kanałów wysiętku oddechowego w obu poligrafach mogą pochodzić z różnic konstrukcyjnych a także z różnego umiejscowienia czujników na ciele pacjenta. Szczegółowa dyskusja uzyskanych wyników działania opracowanego układu znajduje się w rozdziale 5.2.2 pracy. Z tego rozdziału pochodzi również przykładowy sygnał zarejestrowany przez omawiany układ przedstawiony na Rys. 2.

3.3. Algorytm wykorzystujący uczenie maszynowe do detekcji i klasyfikacji zaburzeń oddechu

Dużym problemem wpływającym negatywnie na dostępność diagnostyki bezdechu sennego jest ograniczona liczba specjalistów pulmonologów, którzy dokonują opisu badań i stawiają diagnozy. Z tego powodu pożądane jest poszukiwanie metod uczynienia ich pracy bardziej wydajną, aby mogli w tym samym czasie pomóc większej liczbie osób. Jednym ze sposobów osiągnięcia tego celu jest wykorzystanie algorytmów komputerowych do wstępnej analizy zapisów i oznaczenia zaburzeń, które potem zostaną przedstawione lekarzowi do korekty i akceptacji. Opisany w pracy algorytm pozwala na automatyczne oznaczanie zaburzeń oddychania wraz z podziałem na bezdech i sptyczenie oddechu poprzez wstępne oznaczanie początków epizodów, co stanowi oryginalne podejście do tego zagadnienia. W toku badań weryfikowano możliwość wykorzystania różnych architektur do realizacji tego celu, z których jedynie dwuetapowa sieć LSTM wraz z dedykowanym przetwarzaniem wstępnym i końcowym uzyskała wyniki mogące zapewnić jej zastosowanie w rzeczywistym systemie. Nie oznacza to jednak, że skonstruowanie skutecznego klasyfikatora z użyciem innej metody jest niemożliwe. Algorytm został opracowany oraz przetestowany przy wykorzystaniu baz danych SHHS-1 [7], [8] oraz PhysioNet [9], [10], a następnie dostosowano go do przyjmowania sygnałów pochodzących z Comarch PulmoVest. Działanie opracowanego klasyfikatora z danymi wejściowymi pochodzącymi z zaprojektowanego poligrafu przeanalizowano w rozdziale 5.3 rozprawy. Najlepszą jakość detekcji i rozróżniania zaburzeń oddechu uzyskano wykorzystując sygnały przepływu powietrza, wysiłku oddechowego oraz nasycenia krwi tlenem. Tablicę pomyłek dla tego wariantu przedstawia Rys. 3. Uzyskana jakość klasyfikacji pozwala na wykorzystanie algorytmu jako narzędzia wspomagającego pracę lekarza przy opisywaniu badań poligraficznych pod kątem diagnostyki bezdechu sennego.



Rys. 3 Tablica pomyłek klasyfikacji epizodów za pomocą opracowanej architektury na bazie LSTM z dodatkowym wykorzystaniem sygnału SpO2 dla trzykrotnej walidacji krzyżowej, średnia arytmetyczna i odchylenie standardowe. Wartości znormalizowane wierszami i zaokrąglone do dwóch miejsc po przecinku. Dane z urządzenia Comarch PulmoVest zebrane podczas eksperymentu medycznego.

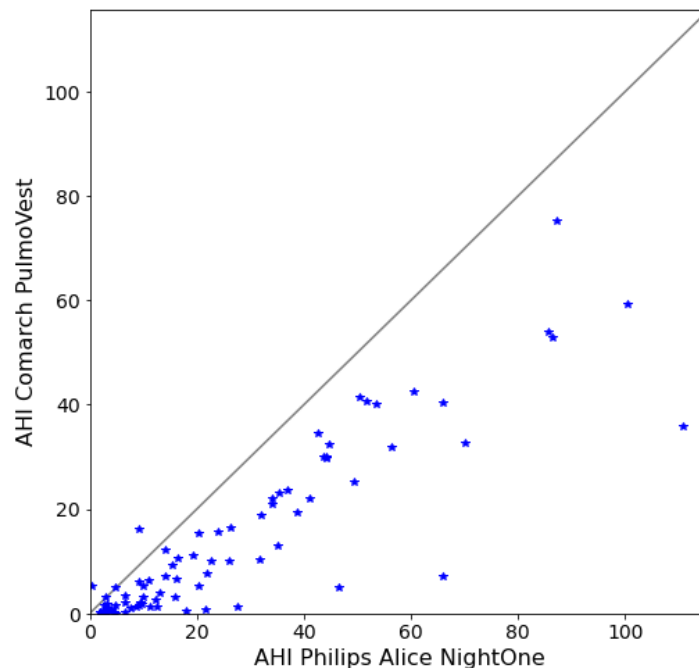
3.4. Porównanie działania zaprojektowanego systemu z urządzeniem dostępnym komercyjnie

Wymienione powyżej elementy weszły w skład systemu do domowej diagnostyki bezdechu sennego Comarch PulmoVest, z wykorzystaniem którego wykonano sto badań w ramach eksperymentu medycznego zatwierzonego przez Komisję Bioetyczną przy Okręgowej Izbie Lekarskiej w Krakowie. Celem badań było sprawdzenie poprawności działania urządzenia a także porównanie jakości zapisów z poligrafem dostępnym na rynku. Wybrano do tego celu urządzenie Philips Alice NightOne, które było zakładane razem z testowanym poligrafem. Na podstawie wyników eksperymentu medycznego wyciągnięte zostały następujące wnioski:

- Urządzenie Comarch PulmoVest działa stabilnie i pozwala na całościową rejestrację sygnałów życiowych koniecznych w diagnostyce bezdechu sennego.
- Sygnał wysiłku oddechowego uzyskany przy użyciu nowatorskiego układu wykorzystującego czujnik rezystancyjny cechuje się jakością wystarczającą do użycia przy rozróżnianiu typów zaburzeń oddychania.

- Zaprojektowane algorytmy uczenia maszynowego działają stabilnie i powtarzalnie na sygnałach zarejestrowanych przez Comarch PulmoVest, a dołożenie kanału SpO2 do zestawu analizowanych danych pozwala na dalszą poprawę jakości klasyfikacji.

Wyniki eksperymentu medycznego opisano w rozdziale 5 dysertacji, skąd pochodzi również Rys. 4 przedstawiający porównanie AHI wyznaczonego przez specjalistę pulmonologa na podstawie zapisów Comarch PulmoVest i Alice NightOne bez użycia algorytmów komputerowych wspomagających opis.



Rys. 4 Porównanie indeksów AHI wyznaczonych przy użyciu Comarch PulmoVest (współrzędna Y każdego z punktów) i Alice NightOne (współrzędna X każdego z punktów).

W eksperymencie tym nie wykorzystano polisomnografu, dlatego jako wartość prawidłową przyjęto AHI pochodzące z opisu badania Alice NightOne. Idealne dopasowanie obrazuje linia $X=Y$. Większość punktów znajduje się pod nią, co oznacza mniejszą liczbę zaburzeń wykrywanych w sygnałach pochodzących z Comarch PulmoVest. Wynika to wprost z innego typu czujnika przepływu powietrza zastosowanego w obu urządzeniach. Szczegółowa dyskusja tej oraz innych obserwacji znajduje się w rozdziale 5 pracy. W toku eksperymentu medycznego zweryfikowano poprawność działania opracowanych algorytmów wspomagających opisywanie badań, jak przedstawiono w Rozdziale 3.3. Referencyjny system

oferuje również możliwość wstępnej analizy badań, jednak jego zamknięta struktura sprawia, że nie są dostępne żadne informacje o sposobie działania tych narzędzi ani o ich dokładności. W obliczu braku dostępu do kluczowych danych porównanie działania obu systemów w tym zakresie nie było możliwe.

4. Podsumowanie

Praca opisuje projekt systemu do zdalnej domowej diagnostyki bezdechu sennego Comarch PulmoVest. Zagadnienie to jest istotne ze względu na implikacje zdrowotne i społeczne powodowane przez to schorzenie. Poprawienie dostępności diagnostyki i upowszechnienie leczenia może przyczynić się do polepszenia komfortu życia pacjentów a także ich bezpieczeństwa poprzez ograniczenie senności i liczby wypadków spowodowanych z jej powodu. W skład systemu wchodzi technologie, które mogą w przyszłości istotnie usprawnić prowadzenie diagnostyki poza placówką medyczną. W ramach badań zaprojektowano i zaimplementowano oryginalny układ elektroniczny obsługujący czujnik rezystancyjny do pomiaru wysiłku oddechowego. Zaprojektowany został również algorytm wykorzystujący uczenie maszynowe, służący do oznaczania epizodów bezdechu i sptyceń oddechu, bazujący na nowatorskiej koncepcji wstępnego oznaczania początków zaburzeń. Szczegóły dotyczące projektu, implementacji i wyników działania czujnika oddechowego oraz algorytmów automatycznych zostały opublikowane w czasopiśmie recenzowanych. Są one więc dostępne jako podstawa do dalszego rozwoju a także dla porównania z innymi metodami, co wyróżnia je na tle rozwiązań konkurencyjnych mających najczęściej zamkniętą strukturę. Cały system przetestowano podczas eksperymentu medycznego i porównano uzyskane dane z sygnałami zapisanymi równolegle przez urządzenie dostępne komercyjnie. Na podstawie tych analiz wykazano, że silikon przewodzący zastosowany jako czujnik wysiłku oddechowego może być wykorzystany do diagnostyki bezdechu sennego. Urządzenie podczas testów działało stabilnie i pozwalało na zebranie sygnałów dobrej jakości. Zaprojektowane algorytmy uczenia maszynowego uzyskały dobre wyniki klasyfikacji zaburzeń oddechu dla zarejestrowanych sygnałów, a dodanie nasycenia krwi tlenem do zestawu analizowanych kanałów pozwoliło istotnie poprawić ich dokładność. Tym samym tezy pracy zostały wykazane. Ponadto zaprojektowany system umożliwia zdalne przesyłanie badań i pomiar EKG bez

zakładania dodatkowych akcesoriów, co wyróżnia go na tle konkurencji i może istotnie zwiększyć liczbę wykonywanych badań i poprawić ich wartość diagnostyczną. Comarch PulmoVest posłuży jako punkt wyjścia do skonstruowania poligrafu typu III dostępnego komercyjnie, co pozwoli udostępnić korzyści wynikające z otrzymanych wyników badań szerokiemu gronu odbiorców.

5. Publikacje autora rozprawy

- **J. Drzazga**, “Design of a Telemedical Vest for Sleep Disorder Diagnosis - A Preliminary Analysis,” *Image Process. Commun.*, 2019, doi: 10.1515/ipc-2018-0004.

- **J. Drzazga** and B. Cyganek, “An LSTM Network for Apnea and Hypopnea Episodes Detection in Respiratory Signals,” *Sensors*, vol. 21, no. 17, p. 5858, Aug. 2021, doi: 10.3390/s21175858. Impact factor 3,847.

- **J. Drzazga** and B. Cyganek, “Offset compensation in resistive stretch sensors using low frequency feedback topology,” *Electronics*, vol. 11, no. 19, p. 3158, Oct. 2022, doi: 10.3390/electronics11193158. Impact factor 2,69.

- **J. Drzazga** (2019). „Urządzenie do monitorowania oddechu” (Polska, Pat.239483). Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej

Bibliografia

- [1] R. Heinzer *et al.*, “Prevalence of sleep-disordered breathing in the general population: THE HypnoLaus study,” *Lancet Respir. Med.*, 2015, doi: 10.1016/S2213-2600(15)00043-0.
- [2] X. Zhou, Q. Lu, S. Li, Z. Pu, F. Gao, and B. Zhou, “Risk factors associated with the severity of obstructive sleep apnea syndrome among adults,” *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–6, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-70286-6.

- [3] Z. Xu *et al.*, "Risk factors of obstructive sleep apnea syndrome in children," *J. Otolaryngol. - Head Neck Surg.*, vol. 49, no. 1, pp. 3–9, 2020, doi: 10.1186/s40463-020-0404-1.
- [4] A. Viswanath, J. Ramamurthy, S. P. S. Dinesh, and A. Srinivas, "Obstructive sleep apnea: awakening the hidden truth.," *Niger. J. Clin. Pract.*, vol. 18, no. 1, pp. 1–7, doi: 10.4103/1119-3077.146964.
- [5] N. M. Punjabi, "The epidemiology of adult obstructive sleep apnea.," *Proc. Am. Thorac. Soc.*, vol. 5, no. 2, pp. 136–43, Feb. 2008, doi: 10.1513/pats.200709-155MG.
- [6] R. B. Berry *et al.*, *The AASM Manual for the Scoring of Sleep and Associated Events: Rules, Terminology and Technical Specifications*, V2.6. Darien, IL: American Academy of Sleep Medicine, 2020.
- [7] S. F. Quan *et al.*, "The Sleep Heart Health Study: Design, rationale, and methods," *Sleep*, 1997, doi: 10.1093/sleep/20.12.1077.
- [8] G. Q. Zhang *et al.*, "The National Sleep Research Resource: Towards a sleep data commons," *J. Am. Med. Informatics Assoc.*, 2018, doi: 10.1093/jamia/ocy064.
- [9] "St. Vincent's University Hospital / University College Dublin sleep apnea database." <http://physionet.org/physiobank/database/ucddb/> (accessed Sep. 28, 2020).
- [10] A. L. Goldberger *et al.*, "PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: components of a new research resource for complex physiologic signals.," *Circulation*, 2000, doi: 10.1161/01.cir.101.23.e215.