

Częstochowa, 22 grudnia 2025 r.

dr hab. inż. Marcin Zalasinski, prof. PCz

Katedra Sztucznej Inteligencji

Wydział Informatyki i Sztucznej Inteligencji

Politechnika Częstochowska

Al. Armii Krajowej 36

42-202 Częstochowa

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Michała Kassjańskiego
pt. „*Zastosowanie algorytmów sztucznej inteligencji
do analizy audiometrii tonalnej*”,
której promotorem jest dr hab. inż. Marcin Kulawiak, prof. PG

1. Zakres tematyczny rozprawy

Recenzja rozprawy doktorskiej została przygotowana na podstawie pisma Pana dra hab. inż. Jacka Raka, prof. PG, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Gdańskiej. Pismo to zostało utworzone dnia 5 listopada 2025 roku.

Recenzowana rozprawa została napisana w języku angielskim, rozpoczyna się od podziękowań oraz streszczenia napisanego w dwóch językach (w tym w j. polskim), a jej dalszą część stanowi 7 rozdziałów. Całość została przedstawiona na 108. stronach.

Tematyka rozprawy nawiązuje do zagadnienia klasyfikacji typu ubytku niedosłuchu na podstawie wyników badań audiometrii tonalnej. Proces klasyfikacji przeprowadzany jest z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji, ze szczególnym uwzględnieniem sieci neuronowych o różnych architekturach. Badania zrealizowane w ramach recenzowanej rozprawy zostały przeprowadzone z wykorzystaniem danych rzeczywistych, pozyskanych we współpracy z Kliniką Otolaryngologii Uniwersyteckiego Centrum Klinicznego w Gdańsku. W mojej opinii podjęta tematyka rozprawy jest istotna i interesująca zarówno z badawczego, jak i praktycznego punktu widzenia.

Recenzowana rozprawa doktorska rozpoczyna się od rozdziału pt. *Introduction (Wstęp)*. Rozdział ten nie zawiera odrębnego wprowadzenia, lecz zaczyna się bezpośrednio od pierwszego



podrozdziału. W ramach *Wstępu* Doktorant prezentuje pięć podrozdziałów. Pierwszy z nich zawiera informacje dotyczące zarysu rozprawy – wskazano w nim, że praca opiera się na cyklu pięciu publikacji oraz przedstawiono jej strukturę. Drugi z podrozdziałów przedstawia motywację Doktoranta do podjęcia wybranego tematu rozprawy doktorskiej. Opisano w nim problem występowania ubytku słuchu oraz jego wpływ na społeczeństwo i gospodarkę światową, a także wskazano na konieczność wczesnego rozpoznawania i klasyfikacji tej dolegliwości. Jest to niezwykle istotne z perspektywy leczenia wspomnianych schorzeń, ponieważ właściwa diagnostyka umożliwia skuteczne leczenie chorób związanych z niedosłuchem. Rozpoznanie to jest jednak bardzo trudne bez zastosowania specjalistycznego sprzętu i w praktyce odbywa się z wykorzystaniem tzw. audiometrii tonalnej, która dostarcza wyników w postaci audiogramów. Audiogramy te są następnie analizowane przez zespół ekspertów. Zastosowanie metod sztucznej inteligencji umożliwia szybką i precyzyjną analizę wspomnianych audiogramów, wspomagając, a w przyszłości potencjalnie zastępując specjalistę w postawieniu odpowiedniej diagnozy.

Podrozdział 1.3 przedstawia trzy hipotezy badawcze sformułowane przez Doktoranta, które brzmią następująco:

H1. Zastosowanie nowoczesnych architektur sieci neuronowych w klasyfikacji typów ubytku słuchu na podstawie danych audiometrycznych może istotnie poszerzyć stan wiedzy w tej dziedzinie oraz doprowadzić do opracowania metod o odpowiednim poziomie wydajności i dokładności, możliwych do wdrożenia w praktyce klinicznej.

H2. Nowoczesne architektury sieci neuronowych, przeznaczone do przetwarzania danych rastrowych i szeregów czasowych, są zdolne do dokładnej klasyfikacji nieprzetworzonych wyników testów audiometrii tonalnej.

H3. Istnieje możliwość optymalizacji nowoczesnych architektur sieci neuronowych w taki sposób, aby mogły one efektywnie działać na smartfonach kosztujących mniej niż 100 USD, zapewniając tym samym specjalistom z całego świata mobilną aplikację umożliwiającą klasyfikację rodzaju ubytku słuchu na podstawie obrazów wyników testów słuchu pobranych aparatem smartfona.

Hipotezy te zostały sformułowane poprawnie. Na bazie ww. hipotez, w podrozdziale 1.4 zostały sformułowane cztery cele realizowane w ramach rozprawy doktorskiej:

G1. Przegląd istniejących modeli klasyfikacyjnych danych z audiometrii tonalnej oraz ocena ich przydatności do zastosowań klinicznych.

G2. *Przeprowadzenie testów różnych architektur sieci neuronowych na nieprzetworzonych danych audiometrycznych w celu opracowania modelu klasyfikacji rodzaju ubytku słuchu.*

G3. *Opracowanie modelu głębokiego uczenia do klasyfikacji rodzaju ubytku słuchu, którego dokładność pozwoliłaby na jego wykorzystanie w praktyce klinicznej.*

G4. *Stworzenie aplikacji mobilnej umożliwiającej wykorzystanie opracowanego modelu do klasyfikacji rodzaju ubytku słuchu na podstawie fotografii wyników testu audiometrycznego.*

W mojej opinii cele te zostały określone prawidłowo.

W podrozdziale 1.5 przedstawiono listę publikacji (indeksowanych jako P1-P5), wchodzących w skład osiągnięcia naukowego Doktoranta i nawiązujących do tematu niniejszej rozprawy. Są to publikacje wydane w 3. czasopismach oraz 2. materiałach konferencyjnych. Wkład Doktoranta w powstanie każdej ww. pracy został określono jako 70% (zostało to poparte zamieszczeniem w ramach pracy stosownych oświadczeń współautorów), a łączna liczba punktów przyznanych za wspomniane publikacje wynosi 490. W mojej opinii jest to wynik bardzo dobry.

Kolejny rozdział pracy przedstawionej do recenzji nosi tytuł *The problem of hearing loss type classification (Problem klasyfikacji typu ubytku słuchu)*. Składa się on z trzech podrozdziałów, w których Doktorant dokonuje stosownego wprowadzenia do rozważanego w ramach rozprawy zagadnienia. Pierwszy ze wspomnianych podrozdziałów definiuje pojęcie audiometrii tonalnej jako skutecznego sposobu badania ubytku słuchu. Badanie to polega na odtwarzaniu osobie badanej serii tonów o różnych częstotliwościach, których głośność jest stopniowo zmieniana, w celu określenia najniższego poziomu dźwięku, jaki jest ona w stanie usłyszeć. Celem badania jest określenie progu słyszenia zarówno dla przewodnictwa powietrznego, jak i kostnego. Przewodnictwo powietrzne ocenia funkcjonowanie całego układu słuchowego, natomiast przewodnictwo kostne pozwala ocenić działanie ucha wewnętrznego i struktur nerwowych, omijając ucho zewnętrzne i środkowe. Dzięki temu można odróżnić, z jakich problemów wynika potencjalny ubytek słuchu. W kolejnym podrozdziale Doktorant przedstawia strukturę danych, które są rezultatem przeprowadzenia badania audiometrii tonalnej. Są one prezentowane w formie audiogramu, który stanowi graficzną reprezentację minimalnej intensywności dźwięku, mierzonej w decybelach, jaką osoba jest w stanie usłyszeć przy różnych częstotliwościach. Doktorant wyjaśnia, że oś pozioma audiogramu reprezentuje częstotliwość w zakresie obejmującym pasmo słyszalne człowieka (zazwyczaj od 125 Hz do 8000 Hz), a oś pionowa przedstawia poziom słyszenia badanego mierzony w decybelach

(zwykle od -10 dB, co oznacza bardzo dobry słuch, do 120 dB, co oznacza głęboki ubytek słuchu). W ramach opisu audiogramu zostało także wyjaśnione znaczenie symboli, które są na nim przedstawione, m.in. oznaczające progi przewodnictwa powietrznego i kostnego dla wybranego ucha. Doktorant informuje, że zbiory danych wykorzystane we wszystkich artykułach wchodzących w skład niniejszej rozprawy pochodzą z badań przeprowadzanych w latach 2011-2022 na dorosłych pacjentach w Klinice Otolaryngologii Uniwersyteckiego Centrum Klinicznego w Gdańsku. Określa też szczegóły techniczne realizacji ww. badań. Nadmienia też, że ich wynikiem oprócz graficznej reprezentacji audiogramu, są także audiogramy reprezentowane za pomocą plików XML, które były wykorzystywane w artykułach P1-P4. Ostatni podrozdział tej części pracy przedstawia klasyczne metryki stosowane w zadaniach klasyfikacji oraz detekcji obiektów.

Trzeci rozdział rozprawy pt. *Automated classification of pure tone audiometry data (Automatyczna klasyfikacja danych z audiometrii tonalnej)* zawiera podsumowanie badań dotyczących automatycznej klasyfikacji typu ubytku słuchu, opublikowanych w czterech pracach Doktoranta (P1–P4). Rozdział ten rozpoczyna się jednak od podrozdziału przedstawiającego przegląd literatury. Omawiany podrozdział porusza zagadnienie klasyfikacji danych audiometrycznych w literaturze światowej. Doktorant wskazuje, że obszar ten można podzielić na dwie główne grupy metod: (1) klasyfikujące kształty audiogramów w celu określania bazowych konfiguracji aparatów słuchowych oraz (2) metody służące do diagnozy rodzaju ubytku słuchu. Następnie zauważa, że pierwszy z tych problemów jest częściej podejmowany w badaniach naukowych. Niniejsza rozprawa nawiązuje do drugiej z wymienionych grup metod. Jako przykłady metod tego typu Autor przywołuje dwa artykuły: pierwszy (Elbaşı, E., Obalı, M. Classification of hearing losses determined through the use of audiometry using data mining, w: 9th International Conference on Electronics, Computer and Computation, 2012), w którym zastosowano drzewa decyzyjne C4.5, naiwny klasyfikator bayesowski oraz sieć neuronową typu MLP; oraz drugi (Crowson, M. G. et al. AutoAudio: Deep learning for automatic audiogram interpretation. J. Med. Syst., 2020), wykorzystujący głęboką sieć konwolucyjną ResNet-101. Pierwszy z autorów uzyskał dokładność klasyfikacji na poziomie 95,5%, natomiast drugi – 97,5%. Doktorant podkreśla, że wyniki te uzyskano na stosunkowo małych zbiorach danych. Zwraca także uwagę na ograniczenia najlepiej działającego z klasyfikatorów, który – jako model przetwarzający obrazy – nie może być stosowany bezpośrednio na oryginalnych seriach danych z audiometrii tonalnej, wymagających wcześniejszego przekształcenia do formy obrazów, co może prowadzić do utraty istotnych informacji. Przegląd literatury został wykonany poprawnie.

W kolejnych trzech podrozdziałach, pt. *Binary classification (Binarna klasyfikacja)*, *Classification of three types of hearing loss* (Klasyfikacja trzech typów ubytku słuchu) oraz *Full classification of hearing loss type* (Pełna klasyfikacja typu ubytku słuchu), Doktorant przedstawia swoje osiągnięcia naukowe zaprezentowane w artykułach P1–P4. Szczegółowo omówię je w rozdziale 2. niniejszej recenzji.

Czwarty rozdział rozprawy pt. *Processing of tonal audiometry data on mobile devices* (Przetwarzanie danych z audiometrii tonalnej na urządzeniach mobilnych) przedstawia osiągnięcia Doktoranta zaprezentowane w ramach artykułu P5. Omówię je szczegółowo w rozdziale 2. niniejszej recenzji.

Piąty rozdział rozprawy przedstawionej do recenzji zawiera podsumowanie i wnioski z przeprowadzonych badań. Rozdział ten składa się z dwóch podrozdziałów. W pierwszym z nich Doktorant ocenia stopień realizacji postawionych w ramach pracy celów oraz przeprowadza ocenę postawionych hipotez badawczych, a także wskazuje swój wkład w rozwój stanu wiedzy w zakresie zastosowania algorytmów sztucznej inteligencji do analizy audiometrii tonalnej. Do oceny ww. wkładu Autora wróć w rozdziale 2. niniejszej recenzji. W drugim podrozdziale zostały zamieszczone proponowane kierunki dalszych badań, wśród których znalazły się: (1) opracowanie modelu umożliwiającego bardziej precyzyjną klasyfikację wyników badań z uwzględnieniem prawdopodobieństwo występowania określonych zaburzeń słuchu (np. zapalenia ucha środkowego, otosklerozy, itp.), (2) stworzenie aplikacji mobilnej do klasyfikacji audiogramów dla systemu iOS, (3) zaprojektowanie systemu digitalizacji audiogramów skutecznego zarówno w przypadku wydrukowanych i odręcznie rysowanych wykresów, (4) udoskonalanie aplikacji mobilnej w celu umożliwienia precyzyjnej oceny słuchu w warunkach domowych. O ile cele 1 i 3 noszą charakter badań naukowych, cele 2 i 4 wydają się stricte inżynierskie. Na końcu podrozdziału Autor podkreśla, iż wynikiem niniejszej rozprawy jest także nawiązanie współpracy pomiędzy Politechniką Gdańską, reprezentowaną m.in. przez Doktoranta oraz Gdańskim Uniwersytetem Medycznym.

Rozdział 6 niniejszej rozprawy zawiera krótką notkę dotyczącą zasobów obliczeniowych wykorzystanych w ramach jej realizacji. W mojej opinii można było pokusić się o umieszczenie jej w dodatkowej sekcji *Acknowledgments*, co jest powszechnie stosowaną praktyką w pracach naukowych.

W Rozdziale 7 zostały przedstawione pozycje bibliograficzne, do których Autor odnosi się w ramach niniejszej rozprawy.

Dalsza część rozprawy przedstawionej do recenzji obejmuje zestaw artykułów naukowych, które wchodzi w skład niniejszej dysertacji i tworzą jej zasadniczą część merytoryczną. Część ta zawiera także stosowne oświadczenia współautorów ww. artykułów, określające ich wkład w powstanie wszystkich zamieszczonych prac.

W ramach podsumowania Rozdziału 1. niniejszej rozprawy należy stwierdzić, że struktura przedstawionej rozprawy doktorskiej jest właściwa.

2. Oryginalne rezultaty uzyskane w rozprawie

Do oryginalnych rezultatów uzyskanych w rozprawie doktorskiej Pana mgr Michała Kassjańskiego zaliczyć należy przede wszystkim zaproponowane przez niego metody służące do klasyfikacji ubytków słuchu na podstawie analizy wyników z przeprowadzonych badań audiometrii tonalnej. Rezultaty te można podsumować następująco:

- Opracował, przetestował i opisał metodę binarnej klasyfikacji danych audiometrycznych, która umożliwia przyporządkowanie pacjentów poddawanych ww. badaniom do dwóch grup: pacjentów o prawidłowym słuchu oraz pacjentów z ubytkiem słuchu. Metoda ta stanowi punkt wyjścia do dalszych badań Doktoranta, ukierunkowanych na bardziej szczegółową klasyfikację rodzaju ubytku słuchu. Szczegółowy opis metody oraz uzyskane wyniki zostały zaprezentowane w artykule pt. *Development of an AI-based audiogram classification method for patient referral*, oznaczonym jako P1 w niniejszej rozprawie. W ramach tej pracy przetestowano różne modele sieci neuronowych: wielowarstwowy perceptron (*Multilayer Perceptron*, MLP), konwolucyjną sieć neuronową (*Convolutional Neural Network*, CNN), prostą rekurencyjną sieć neuronową (*Simple Recurrent Neural Network*, *Simple RNN*), sieć neuronową typu GRU (*Gated Recurrent Unit*) oraz sieć neuronową typu LSTM (*Long Short-Term Memory*). Najwyższą dokładność klasyfikacji (98,12%) osiągnęła sieć LSTM, przewyższając skutecznością inne metody prezentowane w literaturze światowej.
- Opracował, przetestował i opisał metodę klasyfikacji rodzaju ubytku słuchu na podstawie danych audiometrycznych. W ramach artykułu oznaczonego w niniejszej rozprawie jako P2, pt. *Detecting Types of Hearing Loss Using Different AI Classification Methods: A Performance Review*, Doktorant zbadał skuteczność różnych metod sztucznej inteligencji w klasyfikacji trzech typów ubytku słuchu: ubytku mieszanego, przewodzeniowego oraz odbiorczego. W tym celu wykorzystano następujące modele klasyfikacyjne stosowane w uczeniu maszynowym: naiwny klasyfikator Bayesa z rozkładem normalnym (*Gaussian Naive Bayes*), metodę k najbliższych sąsiadów (*K-Nearest Neighbors*, *k-NN*), regresję logistyczną (*Logistic Regression*), maszyny wektorów nośnych (*Support Vector Machines*, *SVM*), stochastyczny spadek gradientu (*Stochastic Gradient Descent*, *SGD*), drzewo decyzyjne (*Decision Tree*) oraz las losowy (*Random Forest*). Spośród tych metod najwyższą skuteczność uzyskał klasyfikator SVM, osiągając dokładność 83,38%. Następnie przeprowadzono klasyfikację z wykorzystaniem wybranych modeli sieci neuronowych: sieci neuronowej jednokierunkowej (*Feedforward Neural Network*, *FNN*), konwolucyjnej sieci neuronowej (*Convolutional Neural Network*, *CNN*), grafowej sieci

neuronowej (*Graph Neural Network, GNN*) oraz rekurencyjnej sieci neuronowej (*Recurrent Neural Network, RNN*). Najwyższą skuteczność w tej grupie uzyskała sieć RNN, osiągając dokładność 94,46%. Doktorant zauważa, że w jednej z prac prezentowanych w literaturze światowej autorzy uzyskali skuteczność klasyfikacji wyższą o około 1%, jednak badania te przeprowadzono na zbiorze liczącym jedynie 200 próbek, podczas gdy w niniejszej pracy wykorzystano ponad 4000 próbek, co znacząco zwiększa wiarygodność i odporność uzyskanych wyników. W ramach artykułu pt. *Efficiency of Artificial Intelligence Methods for Hearing Loss Type Classification: An Evaluation* oznaczonego w niniejszej rozprawie jako P3, Doktorant rozszerzył badania przeprowadzone w pracy P2 o dodatkowe modele klasyfikacji – GRU i LSTM, przeanalizował wpływ różnych metod wstępnego przetwarzania danych oraz augmentacji zbioru treningowego na skuteczność klasyfikacji typów ubytku słuchu. Augmentacja została zrealizowana z wykorzystaniem warunkowej generatywnej sieci przeciwstawnej dla danych tabelarycznych (*Conditional Tabular Generative Adversarial Network, CTAB-GAN*), która umożliwia generowanie syntetycznych próbek danych przy zachowaniu zależności pomiędzy cechami numerycznymi i kategorycznymi, z możliwością narzucenia warunku generowania, takiego jak przynależność do określonej klasy. Badania wykazały, że zastosowanie augmentacji danych zbioru treningowego nie prowadzi do wzrostu skuteczności klasyfikacji we wszystkich rozważanych modelach. Z kolei spośród trzech analizowanych metod normalizacji danych wykorzystywanych przez klasyfikatory neuronowe, jedynie metoda Z-Score okazała się akceptowalna. Maksymalną dokładność klasyfikacji osiągnął model sieci LSTM (97,56%), wykorzystujący dane treningowe utworzone za pomocą sieci generatywnej. Warto zauważyć, że w przypadku tego modelu augmentacja danych treningowych przyczyniła się do wzrostu skuteczności klasyfikacji o około 3%.

- Opracował, przetestował i opisał metodę pełnej klasyfikacji ubytku słuchu, przedstawioną w pracy pt. *Automated hearing loss type classification based on pure tone audiometry data*, oznaczonej w niniejszej rozprawie jako P4. Metoda ta wykorzystuje model dwukierunkowej rekurencyjnej sieci neuronowej typu LSTM (Bi-LSTM) i umożliwia określenie, czy badanie audiometryczne dotyczy pacjenta z prawidłowym słuchem, a w przeciwnym wypadku pozwala na identyfikację rodzaju ubytku słuchu - przewodzeniowego, odbiorczego lub mieszanego. Zaproponowane podejście stanowi połączenie koncepcji opisanych w dwóch wcześniejszych metodach. Klasyfikator zastosowany w opisywanym artykule został wytrenowany z wykorzystaniem 15 046 wyników badań audiometrycznych pochodzących od 9 663 dorosłych pacjentów. Do danych treningowych zastosowano normalizację Z-score, a także wprowadzono system wag klas w celu ograniczenia negatywnych skutków nie zrównoważenia klas w zbiorze danych.

Zbiór treningowy zawierał próbki o następującym rozkładzie: 17,17% - prawidłowy słuch, 4,37% - ubytek przewodzeniowy, 26,71% - ubytek mieszany oraz 51,69% - ubytek odbiorczy. Dodatkowo zastosowano stratyfikowaną 10-krotną walidację krzyżową. Zaproponowany w ramach pracy model osiągnął średnią dokładność klasyfikacji na poziomie 99,33%, co można uznać za bardzo dobry wynik, wyróżniający się na tle innych metod klasyfikacji danych audiometrycznych prezentowanych w literaturze światowej.

- Opracował, przetestował i opisał metodę analizy wyników badań audiometrycznych, która może być realizowana z wykorzystaniem mocy obliczeniowej urządzeń mobilnych. Metoda ta została przedstawiona w pracy pt. *Development and testing of an open source mobile application for audiometry test result analysis and diagnosis support*, oznaczonej w niniejszej rozprawie jako P5. Umożliwia ona ocenę stanu słuchu pacjenta z wykorzystaniem urządzenia mobilnego. Opracowana metoda bazuje na analizie zdjęć audiogramów, z których dane muszą zostać pozyskane, a następnie sklasyfikowane. W celu odczytu charakterystycznych informacji ze zdjęcia audiogramu Doktorant wykorzystał algorytm detekcji krawędzi Canny'ego, probabilistyczną transformatę Hough, model YOLOv5s oraz technologię OCR. Klasyfikacja wyników realizowana jest z użyciem modelu Bi-LSTM, który został zoptymalizowany z zastosowaniem technik kwantyzacji po treningu, pod kątem wykorzystania na urządzeniach mobilnych. Zaproponowana metoda charakteryzuje się wysoką skutecznością detekcji obiektów na analizowanych zdjęciach audiogramów w porównaniu z innymi metodami opisanymi w pracach cytowanych przez doktoranta. W podsumowaniu pracy P5 wskazano również na wysoką skuteczność klasyfikacji, sięgającą 99%. W tym miejscu należy podkreślić, że metoda ta została także wdrożona w aplikacji mobilnej zrealizowanej przez Doktoranta.

W mojej opinii wkład Doktoranta w rozwój dyscypliny naukowej Informatyka techniczna i telekomunikacja należy ocenić jednoznacznie pozytywnie. Analizując rozwój naukowy Pana mgr Michała Kassjańskiego, można zauważyć, że w trakcie realizacji niniejszej rozprawy konsekwentnie dążył on do opracowania metody klasyfikacji rodzaju ubytku słuchu na podstawie wyników badań audiometrii tonalnej, charakteryzującej się wysoką skutecznością. Cel ten był realizowany stopniowo i systematycznie, co w efekcie doprowadziło do uzyskania zamierzonego rezultatu. W ramach swojej pracy naukowej Doktorant wykazał się znajomością metod sztucznej inteligencji oraz umiejętnością ich zastosowania do rozwiązania postawionego problemu badawczego.

Na szczególne podkreślenie zasługuje również dążenie Doktoranta do powiązania uzyskanych wyników badań z praktycznym zastosowaniem. Niezbitym tego dowodem jest opracowanie

algorytmu funkcjonującego na urządzeniach mobilnych, który może być w prosty sposób wykorzystywany przez personel medyczny.

Należy także stwierdzić, że wszystkie cele postawione przez Doktoranta w niniejszej rozprawie zostały w pełni zrealizowane, co pozwala uznać, iż założone hipotezy badawcze zostały potwierdzone.

3. Uwagi dotyczące rozprawy

Recenzowana rozprawa została przygotowana bardzo starannie i jej wartość merytoryczną oceniam wysoko. Wkład wniesiony przez Pana mgra Michała Kassjańskiego w rozwój dyscypliny naukowej Informatyka techniczna i telekomunikacja nie budzi moich zastrzeżeń. W związku z tym, poniższe uwagi i pytania nie wpływają na pozytywną ocenę recenzowanej pracy, a mają jedynie charakter dyskusyjny. Oto one:

- W ramach przedstawionych wyników badań modele klasyfikacyjne charakteryzujące się najwyższą skutecznością opierają się na wykorzystaniu sieci neuronowych typu LSTM. Czy Autor analizował charakter zależności sekwencyjnych pomiędzy kolejnymi częstotliwościami audiometrycznymi, których istnienie sugerują bardzo dobre wyniki tych modeli?
- Czy podczas akwizycji danych treningowych uwzględniono czynniki środowiskowe oraz wiek pacjentów, tak aby zbiór audiogramów był reprezentatywny dla różnych grup wiekowych i zróżnicowanych warunków ekspozycji środowiskowej?
- Ciekawym problemem badawczym mogłaby być analiza ubytku słuchu realizowana dla tych samych pacjentów w określonych odstępach czasowych, np. w formie badań kontrolnych. Czy Autor rozważał możliwość realizacji takiego scenariusza badawczego?
- Interesujące byłoby porównanie skuteczności i czasu działania metody przedstawionej w ramach artykułu P4 oraz metody dla urządzeń mobilnych dla tych samych audiogramów. Czy jest możliwe przedstawienie takiego porównania?
- Czy dwa z czterech wspomnianych w ramach rozprawy kierunków dalszych badań - stworzenie aplikacji mobilnej do klasyfikacji audiogramów dla systemu iOS, udoskonalanie aplikacji mobilnej w celu umożliwienia precyzyjnej oceny słuchu w warunkach domowych - mają charakter naukowy?
- Na koniec drobna uwaga edytorska – w większości rozdziałów zabrakło numeracji wzorów, która pojawiła się np. w podrozdziale 3.3.2.

4. Podsumowanie i konkluzja

W podsumowaniu stwierdzam, co następuje:

- Autor rozprawy doktorskiej podjął zagadnienie analizy wyników audiometrii tonalnej, ze szczególnym uwzględnieniem klasyfikacji typu niedosłuchu. Jest to istotny problem badawczy, zwłaszcza z punktu widzenia społecznego.
- Rozprawa doktorska zawiera szereg oryginalnych i wartościowych rezultatów naukowych, została zredagowana w sposób poprawny, poszczególne wątki zostały w niej przedstawione w sposób kompetentny. Przygotowanie jej potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Kandydata do stopnia doktora.
- Rozprawa stanowi dobre podsumowanie ogólnej wiedzy teoretycznej mgra Michała Kassjańskiego w zakresie dyscypliny Informatyka techniczna i telekomunikacja.

W konkluzji stwierdzam, że praca doktorska *„Zastosowanie algorytmów sztucznej inteligencji do analizy audiometrii tonalnej”*, której autorem jest Pan mgr Michał Kassjański, spełnia wymagania obowiązującej ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym. Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Uwzględniając wysoką wartość merytoryczną rozprawy, jej praktyczny charakter przejawiający się w implementacji opracowanej metody na urządzeniach mobilnych oraz dorobek publikacyjny Doktoranta, wnioskuję o wyróżnienie niniejszej rozprawy.

Marek Zdobych