

Prof. dr hab. inż. Bożena Kostek
Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Lab. Akustyki Fonicznej

31. 10. 2022 r.

Opinia nt. rozprawy doktorskiej mgra inż. Marcina Kajora

pt.: „**Pozyskiwanie i analiza sygnałów akustycznych pochodzenia biologicznego jako technika wspierająca diagnostykę narządu żucia**”, wykonanej pod kierunkiem dra hab. inż. Eliasza Kańtocha, prof. AGH.

Ocena tematyki rozprawy

Tematyka rozprawy mgra inż. Marcina Kajora dotyczy pozyskiwania i automatycznej analizy sygnałów akustycznych pochodzących ze stawów żuchwowo-skroniowych, a więc wpisuje się w nurt automatyzacji metod diagnostycznych w medycynie. Opracowanie metodologii badań narządu żucia, które mogłoby wspomóc automatyczne wspomaganie diagnostyki wydaje się szczególnie istotne ze względu na brak doniesień na ten temat w literaturze.

Recenzowana rozprawa doktorska ma charakter implementacyjno-eksperymentalny, zawiera 124 strony tekstu i składa się z pięciu zasadniczych rozdziałów. Obejmują one krótki wstęp, wprowadzenie, dotyczące wybranych sygnałów bioakustycznych oraz metod diagnostyki stawów żuchwowo-skroniowych, metody pozyskiwania i przetwarzania sygnałów bioakustycznych, opracowane metody i analizy sygnałów bioakustycznych narządu żucia, weryfikację opracowanych metod, podsumowanie i bibliografię zawierającą 97 pozycji. W pracy znajdują się cztery Dodatki: A – zawierający zgodę Komisji Bioetycznej Uniwersytetu Jagiellońskiego Collegium Medicum na przeprowadzenie badań w Katedrze i Zakładzie Protetyki Stomatologicznej, B – potwierdzenie, że przeprowadzone badania są w pełni oryginalne, C – opis aplikacji *TMJ RDC Diagnoser (Temporomandibular Joint Hipermobility)* wraz z interfejsem użytkownika oraz D – schematy elektroniczne płytek zaprojektowanych na potrzeby prowadzenia badań: moduł analogowy oraz moduł cyfrowy. Natomiast brak jest w pracy wykazów ważniejszych skrótów i oznaczeń, spisów rysunków i tabel (przywołuję te elementy pracy ze względu na wymagania w mojej macierzystej Uczelni).

Doktorant sformułował w pierwszej kolejności cele rozprawy, które dotyczą w ogólności komputerowego wsparcia badania osłuchowego stawów żuchwowo-skroniowych, służącego poprawie rozpoznania dysfunkcji narządu żucia. Drugim, równie istotnym celem jest z przygotowanie pierwszej, ogólnodostępnej bazy danych sygnałów pozyskanych ze stawów żuchwowo-skroniowych, co może ułatwić naukowcom prowadzenie badań dotyczących osłuchiwanie stawów żuchwowo-skroniowych. Podał też uzasadnienie powyższych celów pracy, tj., że opracowanie metod pozyskiwania, analizy i segmentacji sygnałów akustycznych stawów żuchwowo-skroniowych może przyczynić się do opracowania technik automatycznej diagnostyki narządu żucia, co jest jak najbardziej zasadne.

W rozprawie została zaproponowana następująca teza rozprawy: *„Uwzględnienie sygnałów akustycznych towarzyszących aktywności pracy stawów żuchwowo-skroniowych umożliwi poprawę warunków i rezultatów rozpoznania patologii narządu żucia”*, która jest spójna z przedstawionymi celami rozprawy doktorskiej.

Struktura rozprawy:

Pierwszy rozdział (Wstęp) przywołuje motywację badań, cele rozprawy, tezę, autorskie osiągnięcia oraz przedstawia zawartość rozprawy.

Tytuł drugiego rozdziału odnosi się do wprowadzenia w tematykę auskultacji jako metody diagnostycznej, tj. od przedstawienia auskultacji jako metody diagnostycznej, opisu badań za pomocą wybranych sygnałów bioakustycznych wraz z przywołaniem podstaw teoretycznych zjawisk bioakustycznych. Podrozdział 2.3 dotyczy diagnostyki stawów żuchwowo-skroniowych (BDK/ZCURNŹ – Badawcze Kryteria Diagnostyczne/Zaburzenia Czynnościowe Układu Ruchu Narządu Żucia). Podana została biomechanika narządu żucia oraz kryteria diagnostyczne układu ruchowego narządu żucia. Stanowią one zestawienie procedur klinicznych oraz ankiety (w formie papierowej), która pozwala na dokonanie samooceny problemu i towarzyszącego mu często bólu przez pacjenta. Warto zauważyć, że dopiero połączenie tych technik wraz dodaną rejestracją/analizą sygnałów osłuchowych może stanowić podstawę do automatyzacji tej metodologii. Obecnie diagnoza odbywa się za pomocą diagramów decyzyjnych.

Rozdział 3 zawiera w pierwszej kolejności zestawienie dostępnych rozwiązań stetoskopów elektronicznych (w tym komercyjnych) wraz z ich charakterystyką i ograniczeniami. Przegląd ten ma na celu pokazanie, że żaden z szeroko dostępnych stetoskopów nie rejestruje sygnałów w paśmie poniżej 20 Hz. W kolejnym podrozdziale doktorant opisuje metody przetwarzania sygnałów akustycznych na podstawie przeglądu literatury. Pojawia się też zestawienie skuteczności metod segmentacji sygnałów akustycznych serca wraz z odniesieniem do zastosowanej metody, w tym modeli głębokich. Podrozdział ten stanowi podstawę do dyskusji na temat metod pozyskiwania i analizy sygnałów stawu żuchwowo-skroniowego, które są zawarte w kolejnym podrozdziale (3.2.2). Istotne jest zestawienie charakterystyk czasowo-częstotliwościowych dla poszczególnych typów trzasków związanych z pracą stawu żuchwowo-skroniowego (SŹS). Doktorant zidentyfikował również obszar słabo zarysowany w literaturze, a mianowicie dotyczący badania hipermobilności stawu żuchwowo-skroniowego za pomocą metod akustycznych (i automatyzacji takich badań). Kolejnym wskazanym problemem jest przesłuch pomiędzy sygnałem generowanym przez jeden staw żuchwowo-skroniowy na drugą stronę żuchwy przez tkanki twarzoczaszki.

Rozdział 4 jest pierwszym z rozdziałów, który stanowi oryginalny wkład w badania prowadzone w ramach rozprawy. Odnosi się do opracowanej metody akwizycji i analizy sygnałów bioakustycznych pochodzących od narządu żucia. Pierwszy z podrozdziałów obejmuje projekt opracowanej konstrukcji czujnika bioakustycznego. Autor rozprawy podaje charakterystykę wykorzystywanego przetwornika, który stanowi część konstrukcji czujnika wykorzystywanego w stetoskopie. Projekt stetoskopu elektronicznego został zawarty w rozdziale 4.2 i obejmuje wymagania projektowe, opis modułu analogowego, cyfrowego oraz schemat blokowy rejestratora. Jednak ze względu na brak zgody Komisji Bioetycznej Uniwersytetu Jagiellońskiego opracowany stetoskop nie został wykorzystany bezpośrednio w badaniach w tym ośrodku. Rejestracja sygnałów SŻS została przeprowadzona za pomocą komercyjnego stetoskopu elektronicznego Littmann 3200.

Kolejne podrozdziały odnoszą się do rozwiązań zaproponowanych przez doktoranta, wspierających diagnostykę narządu żucia za pomocą sygnałów akustycznych stawów żuchwowo-skroniowych, tj.:

- aplikacji do automatycznej diagnostyki narządu żucia oraz bazy danych sygnałów akustycznych SŻŚ,
- metody synchronizacji dźwięków SŻS rejestrowanych z obu stawów jednocześnie,
- opracowanych algorytmów segmentacji sygnałów akustycznych SŻS,
- metodę segmentacji sygnałów pochodzących z narządu żucia za pomocą przetwarzania sygnałów oraz modeli głębokich (U-Net, LSTM) (wynik w postaci publikacji w czasopiśmie *Journal of Clinical Medicine* w 2021 r.),
- metodę detekcji hipermobilności SŻS w sygnałach akustycznych (metoda ta została opisana w artykule w czasopiśmie *Journal of Clinical Medicine* w 2021 r.).

Warto zauważyć, że w każdym z podrozdziałów pojawia się nie tylko dyskusja dotycząca metody: przyjętej/odrzuconej, parametrów uczenia, itp., ale również uzasadnienie kolejnych kroków analizy. Doktorant odnosi się też do możliwych wad proponowanego rozwiązania, jak np. nierównomierny docisk głowicy do skóry osoby badanej, powodujący różnice w amplitudzie pozyskiwanego sygnału. Na szczególną uwagę zasługuje rozdział 4.5 dotyczący segmentacji sygnałów, zwłaszcza, że podane metody zostały opublikowane w artykule z 2022 r. w czasopiśmie *Journal of Clinical Medicine*.

Rozdział 5 dotyczy weryfikacji opracowanych metod oraz urządzeń pozyskiwania i analizy sygnałów akustycznych SŻS.

Rozdział 5.1, który stanowi weryfikację opracowanego urządzenia (i przetwornika bioakustycznego) odnosi się do badań laboratoryjnych z wykorzystaniem aparatury pomiarowej w celu wyznaczenia charakterystyki częstotliwościowej urządzenia. Drugi wątek walidacyjny dotyczy akwizycji sygnałów

pochodzących od pracy mięśnia sercowego oraz stawów żuchwowo-skroniowych. W tym pierwszym przypadku doktorant odniósł się w porównaniu do wartości referencyjnych, zaś w drugim – wykonany został pomiar za pomocą stetoskopu Littmann 3200. W Uwagach odniosę się do tej analizy w sposób bardziej szczegółowy. Najbardziej istotny wydaje się pomiar procentowej zawartości widmowej gęstości mocy w pasmach częstotliwości, ale i w tym przypadku mam uwagę korygującą.

Kolejnym etapem walidacji było sprawdzenie korzyści uzyskanych przy zastosowaniu systemu automatycznej diagnozy narządu żucia i pozyskanej bazy sygnałów akustycznych. Po zapoznaniu się lekarzy z działaniem programu wykazano, że zysk czasu wynikający ze skomputeryzowanej obsługi formularza i automatycznego wystawiania diagnoz BKD/ZCURNŻ (Badawcze Kryteria Diagnostyczne Zaburzeń Czynnościowych Układu Ruchu Narządu Żucia) wyniósł średnio 26,9 minut na jednego pacjenta. Czas ten skrócił się wyraźnie i mieści się w granicach 4,5 do 6 minut (dla 10 pacjentów), co daje zysk blisko 27 minut/pacjenta.

W tym samym podrozdziale doktorant przedstawia zaprojektowaną bazę diagnostycznych sygnałów akustycznych pochodzących z pracy stawów żuchwowo-skroniowych, która zawiera rejestracje sygnałów wykonane przez lekarza stomatologa stetoskopem elektronicznym Littmann 3200 podczas każdej wizyty pacjenta, osobno dla prawej i lewej strony. W ten sposób zebrano sygnały dla 87 pacjentów, które zostały przypisane do odpowiednich rekordów pacjenta w opracowanej aplikacji. Sumarycznie opracowana baza danych zawiera 95 rekordów diagnostyki pacjentów (w wieku 19-91 lat), w tym dwa przypadki ze stwierdzoną hipermobilnością oraz 321 zarejestrowanych sygnałów.

Rozdziały 5.3, 5.4 oraz 5.5 odnoszą się do głównych wątków wkładu naukowego doktoranta i dotyczą: (1) wyników synchronizacji sygnałów rejestrowanych równocześnie, (2) walidacji wyników uzyskanych dla algorytmu segmentacji sygnałów stawów żuchwowo-skroniowych, (3) propozycji metody klasyfikacji hipermobilności stawu żuchwowo-skroniowego. Uwagi, które mi się nasunęły w kontekście tych podrozdziałów, podaję poniżej w części recenzji – UWAGI OGÓLNE. Niewątpliwie, zebrane sygnały, możliwość automatyzacji – wspomaganie diagnostyki oraz umożliwienie zastosowania synchronizacji sygnałów w procesie akwizycji sygnałów są wartościowym wkładem w badania naukowe. Warto zauważyć, że proces walidacji zaproponowany przez doktoranta polega na porównaniu wyników wygenerowanych przez opracowane algorytmy z referencyjną maską uzyskaną poprzez manualną segmentację analizowanego sygnału przeprowadzoną przez lekarza stomatologa. W automatycznej klasyfikacji za pomocą algorytmów uczenia, bazy adnotowane przez eksperta dziedzinowego mają dużą wartość.

Rozdział 6 stanowi podsumowanie rozprawy doktorskiej. Przywołane zostały po raz kolejny osiągnięcia, które doktorant uważa za oryginalne. W rozdziale tym znajduje się również odniesienie do treści przedstawianych w poszczególnych rozdziałach, a także do dowodu tezy. Ważny jest wątek odnoszący się do przesłuchu pomiędzy mierzonymi stawami, jak również identyfikacja – w trakcie zbierania danych – dwóch przypadków hipermobilności stawów ŹS. Doktorant zarysowuje również możliwość powiększenia bazy sygnałów poprzez wygenerowanie syntetycznych sygnałów pochodzących z mechanicznego modelu symulujące analizowane zjawiska.

Uwagi ogólne – ocena zawartości rozprawy i metod rozwiązywania postawionych problemów:

Poniżej przedstawię uwagi, które nasunęły mi się w trakcie czytania pracy doktorskiej p. mgra inż. Marcina Kajora. Poniższe uwagi odnoszą się w sposób bardziej szczegółowy (brak precyzji w opisie) do zaproponowanej metodologii badania stawów żuchwowo-skroniowych u pacjentów.

1. Tabela 5.2 – czy jest to błąd w zakresach częstotliwości podanych w tabeli 5.2 (zakres 0-200 Hz), czy w tytule tabeli? Chodzi mi o brak precyzji w opisie. Infradźwięki mierzy się w paśmie częstotliwości od 0 do 20 Hz.
2. Rys. 5.4 i 5.5 – oś pionowa przy pomiarze prawego i lewego stawu ma inną skalę, bardziej zasadne byłoby pokazanie tych analiz w tej samej skali, zwłaszcza, że widoczne są różnice – np. brak symetrii dla prawej i lewej strony (a analizy dotyczą osoby bez zidentyfikowanych problemów). Czy to był jednokrotny (pojedynczy) pomiar dla tej osoby, czy też uśrednienie z kilku pomiarów? Czy są to powtarzalne wyniki – dla danej osoby/dla różnych osób?
3. Tabela 5.3 pokazuje wynik badań dla 10 pacjentów (przeprowadzonych przez 2 lekarzy). Opis przed Tabelą 5.3 mówi o wprowadzeniu danych pochodzących od 85 pacjentów (papierowy formularz i ręczne opracowanie diagnozy trwa w przybliżeniu ponad 32 minuty). W dalszej części opisu jest odniesienie do 95 pacjentów. Ponieważ w tabeli 5.3 pokazane są wyniki dla 10 osób, to warto byłoby pokazać pozostałe wyniki, np. uśrednione (w Dodatku), ale jednak z uwzględnieniem przekroju wiekowego/charakterystyki pacjentów (ponieważ część tej diagnozy powstaje na podstawie odpowiedzi pacjenta) oraz odchylenia standardowego czy mediany wieku. Warto byłoby pokazać te wyniki również w tym kontekście.
4. Opis w rozdziale 5.2 dotyczy rejestracji sygnałów wykonanych przez lekarza stomatologa stetoskopem elektronicznym Littmann 3200 podczas każdej wizyty pacjenta, osobno dla prawej i lewej strony. W ten sposób zebrano 87

sygnałów - rozumiem, że powinno być: 87x2 sygnałów dla 87 pacjentów? Dalej – pojawia się odniesienie do 321 zarejestrowanych sygnałów, czy to znaczy, że było to powtórzenie rejestracji dla pacjenta x? Ponownie brakuje precyzji/wytłumaczenia w opisie.

5. Kolejna uwaga odnosi się do procesu synchronizacji. Na rys. 5.9 pokazano przykład spektrogramu przykładowego sygnału SŻS z impulsami testowymi, ale warto by pokazać też nieudane próby synchronizacji (doktorant pisze o uwarunkowaniach związanych z samym pomiarem i możliwymi problemami w akwizycji sygnałów). Warto by też zastanowić się/podjąć dyskusję na temat miary jakości wygenerowanych znaczników w kontekście automatycznej detekcji tych znaczników, zwłaszcza, że w tym przypadku metoda nie musi być tak wymagająca jak w przypadku automatycznej segmentacji.

6. Doktorant odnosi się do zbioru wykorzystywanego w procesie walidacji w następujący sposób (cytuję):

„Jak wspomniano w poprzednich rozdziałach rozprawy (np. 1.2, 3.2.1) nie znaleziono w literaturze udokumentowanych baz sygnałów akustycznych SŻS oraz metod segmentacji dźwięków generowanych przez narząd żucia. Zatem w celu walidacji zaproponowanych algorytmów segmentacji sygnałów akustycznych stawów żuchwowo-skroniowych, metody opisane w rozdziale 4.5 zostały przetestowane **na zbiorze 129 sygnałów pochodzących od 48 pacjentów** (30 kobiet i 18 mężczyzn, średnia wieku równa 34.6) zgromadzonych w opracowanej bazie (rozdział 4.3). Zgodnie z procedurą DC/TMD, 29% pacjentów zostało zdiagnozowanych jako zdrowi, a u 71% stwierdzono zaburzenia pracy narządu żucia.”

– Nasuwa się więc pytanie, dlaczego nie zostały wykorzystane wszystkie sygnały osób z patologiami znajdujące się w opracowanej bazie, zwłaszcza, że znajduje się tam 321 zarejestrowanych sygnałów (95 osób), oczywiście z podziałem na trening/walidację oraz testy.

7. Rozdział 4.5.2 zawiera opis operacji stosowanych w środkowych warstwach oryginalnej sieci U-Net (na wejściu sygnał jednowymiarowy), które zostały poprzedzone blokami sieci rekurencyjnej LSTM (Long-Short-Term Memory), których wejście stanowi dwuwymiarowa macierz reprezentująca sygnał oraz jego wyekstrahowane cechy.

– brakuje szczegółów dotyczących reprezentacji 2D i „wyekstrahowanych cech” – rozumiem, że w przypadku ekstrakcji cech autor miał na myśli wynik działania sieci bez wglądu, jakie były to cechy sygnału?

Jaki był podział próbek w procesie uczenia, walidacji i testowania?

Uwagi redakcyjne

Rozprawa doktorska jest przygotowana starannie od strony edycyjnej, język rozprawy jest również poprawny, choć zdarzają się drobne usterki i błędy interpunkcyjne. Słowo rys. w zdaniu pojawia się w pisowni z dużej litery (zapewne wynika to z automatycznego przypisania numerów rys., ale w j. polskim jest uważane za błąd ortograficzny). Zdarzają się też usterki typu: „10-cio krotnie” (niepoprawny zapis), itp.

Podsumowanie

Wyniki rozprawy mgr inż. Marcina Kajora z pewnością wnoszą wartość dodaną w kontekście automatyzacji i wspomaganie diagnostyki stawu żuchwowo-skroniowego, co zostało potwierdzone publikacjami. Opracowana baza sygnałów ma na pewno charakter rozwojowy i zapewni możliwość wykorzystania tych danych w dalszych badaniach. Należy też uznać, że skonstruowanie czujnika i opracowanie modelu stetoskopu, nawet jeśli te urządzenia nie zostały wykorzystane bezpośrednio w badaniach klinicznych, świadczą o charakterze implementacyjnym rozprawy. Ponadto należy podkreślić fakt zamieszczenia kodu źródłowego programu w postaci otwartego projektu na licencji GNU General Public License v3.0 na serwerze GitHub pod adresem <https://github.com/marcinkajor/TMJ-RDC-Diagnoser>.

Reasumując, do osiągnięć rozprawy należy zaliczyć:

- skonstruowanie prototypowego rejestratora bioakustycznego wraz z dedykowaną głowicą pomiarową, pozwalającego na pomiary sygnałów akustycznych o częstotliwościach poniżej 20 Hz,
- opracowanie bazy danych sygnałów akustycznych stawu żuchwowo-skroniowego oraz aplikacji komputerowej pozwalającej na automatyzację diagnostyki narządu żucia, wykorzystującej standardowe procedury kliniczne,
- opracowanie prototypu urządzenia i metody do synchronizacji sygnałów akustycznych rejestrowanych z obu stawów żuchwowo-skroniowych jednocześnie,
- opracowanie i porównanie metod segmentacji sygnałów akustycznych stawów żuchwowo-skroniowych,
- projekt metody detekcji hipermobilności narządu żucia wykorzystującej sygnały akustyczne towarzyszące pracy stawów żuchwowo-skroniowych.

Analiza rozprawy doktorskiej i przywołane osiągnięcia wskazują, że zaproponowana teza została udowodniona przez doktoranta.

W kontekście dorobku publikacyjnego doktoranta, który powstał w ramach prowadzonych badań, na podkreślenie zasługują artykuły, które ukazały się w

ostatnich dwóch latach (2021 i 2022) i są cennym uzupełnieniem rozprawy. Niewątpliwie stanowią one jedno z większych osiągnięć rozprawy, zasługujące na co najmniej podkreślenie tego faktu.

Doktorant przesłał odpowiedzi na uwagi zawarte w recenzji pierwotnej wersji rozprawy doktorskiej. Przyjmuję te wyjaśnienia.

W podsumowaniu stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji rozprawa p. Marcina Kajora spełnia wymagania stawiane w Ustawie rozprawom doktorskim i może być podstawą do nadania stopnia doktora nauk inżyneryjno-technicznych. Wobec powyższego wnioskuję o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Kortz", is centered on the page.