



MONOGRAFIA

**POLSKIEGO TOWARZYSTWA AKUSTYCZNEGO
ODDZIAŁ W KRAKOWIE**

DŹWIĘK:

INFORMUJE

SZKODZI

LECZY

**REDAKCJA
IRENEUSZ CZAJKA**

Kraków 2018

MONOGRAFIA

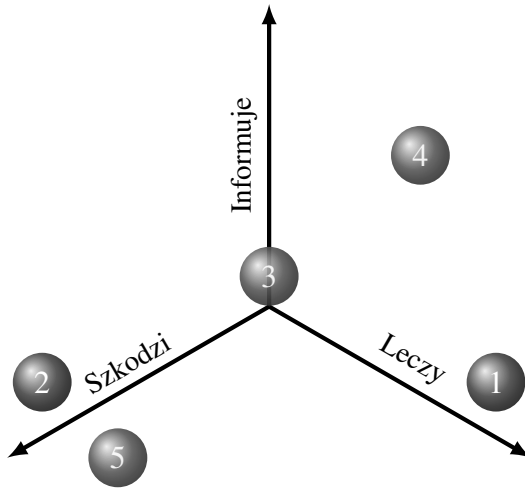
POLSKIEGO TOWARZYSTWA AKUSTYCZNEGO
ODDZIAŁ W KRAKOWIE

DŹWIĘK:

INFORMUJE

SZKODZI

LECZY



KRAKÓW 2018

Wibroakustyka

Monografia Polskiego Towarzystwa Akustycznego Oddział w Krakowie

Kolegium Redakcyjne

Jerzy Wiciak, Tadeusz Wszótek, Dorota Czopek

Autorzy:

Bartłomiej Borkowski - AGH w Krakowie

Ireneusz Czajka - AGH w Krakowie

Dominik Mleczo - AGH w Krakowie

Paweł Pawlik - AGH w Krakowie

Janusz Piechowicz - AGH w Krakowie

Marek Pluta - AGH w Krakowie

Katarzyna Suder-Dębska - AGH w Krakowie

Andrzej Uhryński - AGH w Krakowie

Wiesław Wszótek - AGH w Krakowie

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski – Politechnika Warszawska

prof. dr hab. inż. Jerzy Wiciak – AGH w Krakowie

Redakcja merytoryczna tomu: *Ireneusz Czajka (AGH)*

Skład, łamanie i redakcja techniczna: *Ireneusz Czajka (AGH)*

ISBN: 978-83-61402-38-1

Wydanie pozycji dofinansowali:

Komitet Akustyki PAN oraz

International Commission for Acoustic.

Praca została częściowo zrealizowana w ramach działalności statutowych nr 11.11.130.170 oraz 11.11.130.734.

Wydawca:

Polskie Towarzystwo Akustyczne Oddział w Krakowie

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Spis treści

Wstęp	5
Rozdział 1. Wpływ warunków pracy na parametry diagnostyczne maszyn	9
1.1. Wprowadzenie	9
1.2. Eksperyment diagnostyczny	10
1.3. Metoda analizy sygnałów	11
1.4. Wyniki analizy sygnałów	12
1.5. Podsumowanie	14
Rozdział 2. System pomiarowy do badania parametrów pola akustycznego	15
2.1. Wprowadzenie	15
2.2. Zintegrowany wielokanałowy system do pomiarów akustycznych	17
2.3. Badania rozkładu ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu testowym	21
2.4. Podsumowanie	25
Rozdział 3. Obrazowanie mowy zdeformowanej	27
3.1. Wprowadzenie	27
3.2. Struktura i czynności kanału głosowego	29
3.3. Materiał badawczy i metodyka badań	35
3.3.1. Obszar protetyki stomatologicznej	37
3.3.2. Obszar chirurgii szczękowo-twarzowej	38
3.3.3. Obszar laryngologicznych schorzeń i deformacji (intubacja) krtani	40
3.4. Parametryzacja sygnału mowy	41
3.5. Analiza wyników, podsumowanie	44
Rozdział 4. Wpływ treningu drganiami ogólnymi na organizm człowieka	47
4.1. Wprowadzenie	47
4.2. Metodyka badań	48
4.3. Wyniki badań i analiz	51
4.4. Dyskusja, wnioski oraz perspektywy	54
Wpływ na stabilność postawy	54
Wpływ na zewnętrzną temperaturę kończyn dolnych	54
Wpływ na mechanikę pracy serca (EKG)	54
Wpływ na ciśnienie tętnicze oraz tętno	55
Wpływ na tkankę tłuszczową, masę i temperaturę ciała	55
Wpływ na poziom aktywności (Test Thayera)	55
4.5. Podsumowanie i perspektywy	56

Rozdział 5. Modelowanie hałasu wentylatorów	57
5.1. Wstęp	57
5.2. Hałas wentylatorów	58
5.3. Półempiryczne zależności dotyczące hałasu wentylatorów	62
5.4. Numeryczne modelowanie przepływu	65
5.5. Analogie aeroakustyczne	68
5.5.1. Analogia Lighthilla	68
5.5.2. Analogia Ffowcsa–Williamsa Hawkinsa	69
5.6. Syntezowanie pola prędkości chwilowych	71
5.7. Obiekt	74
5.8. Model numeryczny	74
5.9. Źródła akustyczne	78
5.10. Modelowanie promieniowania kanału wentylatora	79
5.11. Podsumowanie	80
Rozdział 6. Klimat akustyczny górnych przejść dla zwierząt	81
6.1. Wstęp	81
6.2. Obiekty badań	83
6.2.1. Most krajobrazowy w Damienicach	83
6.2.2. Most krajobrazowy w Jasieniu koło Brzeska	84
6.2.3. Mosty krajobrazowe w Łętowicach koło Wierzchosławic	85
6.2.4. Przejścia zespolone w Jodłówce koło Brzeska	85
6.2.5. Przejście zespolone w Sterkowcu koło Brzeska	87
6.3. Analiza klimatu akustycznego badanych przejść dla zwierząt	87
6.4. Podsumowanie	90
Bibliografia	92
Skorowidz	98

Wstęp

Niniejsza praca ma charakter interdyscyplinarny. Jej szeroki zakres pokazuje jak duży jest obszar zainteresowań wibroakustyki. Ta nauka o dźwięku i jego interakcji z obiektami które ograniczają obszar propagacji fali akustycznej dotyka wielu istotnych kwestii życia człowieka.

Już sam tytuł niniejszej monografii: *Dźwięk: informuje, leczy, szkodzi* jest nieco przewrotny sugerując pewne ograniczenie obszaru zainteresowań. Jednak po chwili refleksji można dojść do wniosku, że w wymienionych obszarach zawiera się bardzo szerokie spektrum zagadnień, między innymi te, które są omawiane w tej książce.

Dźwięk informuje czyli jest nośnikiem informacji. Ta informacja może dotyczyć samych źródeł dźwięku i być wykorzystana jako sygnał diagnostyczny, a może być też informacją niesioną przez falę akustyczną, którą to informację odbieramy jako mowę. Innymi słowy fala akustyczna może być elementem kanału informacyjnego podczas komunikacji, a może też być traktowana jak symptom diagnostyczny czy to w diagnostyce medycznej czy diagnostyce maszyn.

Początkowe rozdziały niniejszej monografii nawiązują do tej zdolności fali akustycznej do przekazywania informacji.

Rozdział pierwszy zawiera przykład wykorzystania sygnału zaburzeń akustycznych do diagnostyki. Można się przekonać, że ten sygnał wibroakustyczny pozwala na ocenę stanu maszyny. Jednak część informacji, które niesie ten sygnał może być właściwie zinterpretowana gdy zostaną wzięte pod uwagę informacje o warunkach pracy maszyny. W ten sposób wykazano, że sam sygnał akustyczny czy wibroakustyczny nie zawsze daje pełną informację o stanie urządzenia.

Drugi rozdział zawiera opis systemu, który pozwala na badanie pola akustycznego w pomieszczeniu. Wielokanałowy system daje możliwość oceny wpływu modyfikacji wprowadzanych w pomieszczeniu na pole akustyczne wewnątrz.

Niebagatelne znaczenie ma fakt, że system działa synchronicznie, to znaczy sygnały są rejestrowane z uwzględnieniem przesunięć fazowych.

Zbudowany i przetestowany zintegrowany wielokanałowy system pomiarowy pozwalający na synchroniczną rejestrację sygnałów akustycznych wykazał swoją przydatność przy uzyskiwaniu wiedzy na temat klimatu akustycznego pomieszczenia.

Analiza pola akustycznego wykonywana była na podstawie danych zarejestrowanych przez linię mikrofonów, celem wyodrębnienia poszukiwanych informacji o parametrach pola akustycznego w pomieszczeniu. Uzyskane wyniki przetwarzane w dalszych obliczeniach, mogły służyć do wizualizacji rozkładów ciśnienia akustycznego w obszarze zamkniętym.

Warto wspomnieć, że o wartości systemu stanowi to, iż szereg problemów badawczych lub diagnostycznych wibroakustyki stawia zadania synchronicznego pozyskiwania wielu danych pomiarowych wynikających z rozkładów parametrów pola akustycznego wokół badanych obiektów lub wewnątrz, w badanych obiektach.

Do wspomnianej wcześniej mowy nawiązuje rozdział trzeci. W rozdziale tym przedstawiono wybrane wyniki badań, prowadzonych przez zespół Autorów od kilkunastu lat, dotyczących oceny przydatności wybranych metod przetwarzania sygnału mowy zdeformowanej patologicznie, prezentacji tych wyników z punktu widzenia ich przydatności w diagnostyce i terapii medycznej w zadaniach analizy i oceny mowy zdeformowanej. W przypadku wad wymowy nie ma ścisłych przesłanek pozwalających na w pełni algorytmiczne odwzorowanie sygnału mowy na wielkość liczbową, będącą miarą stopnia jej psychoakustycznej akceptowalności. Autorzy zaproponowali nową metodykę badań a także oryginalne parametry sygnału akustycznego mowy, które wnoszą dodatkowe informacje dotyczące zmian parametrów kanału głosowego (jako źródła dźwięku), objawiających się w postaci deformacji sygnału mowy (mowa patologiczna, wady wymowy). Metody przetwarzania, analizy, klasyfikacji i rozpoznawania sygnału mowy pozornie są znane od wielu lat, ponieważ bez trudu można znaleźć bardzo wiele pozycji literatury, które do tych pojęć się odwołują i prezentują wyniki zarówno badań podstawowych jak i wielu prac aplikacyjnych. W badaniach wykonanych w ramach niniejszej pracy wykorzystywano fakt, że sygnał akustyczny mowy oprócz informacji semantycznych oraz osobniczych zawiera także takie parametry, które mogą być wykorzystane jako nośniki informacji dotyczącej funkcjonowania całego kanału głosowego oraz organów współpracujących w tym procesie. Przedmiotem badań jest sam proces artykulacji mowy oraz wszelkie jego patologiczne deformacje, co determinuje zarówno używane narzędzia analizy sygnału jak i techniki rozpoznawania wybranych obiektów, którymi są formy zniekształcenia mowy konkretnego człowieka chorego w stosunku do mowy całej populacji ludzi zdrowych.

W ten sposób wskazano jak dźwięk, czy inaczej sygnał akustyczny, może mieć wpływ na podnoszenie jakości życia człowieka.

I jednocześnie nastąpiło płynne przejście do drugiej grupy zagadnień, które opisuje niniejsza monografia.

Dźwięk leczy w szerokim tego słowa znaczeniu. To znaczy, może mieć pozytywny wpływ na kondycję człowieka, ale też jest elementem wspierającym wielu terapii. Czasem też zabiegi chirurgiczne prowadzą do upośledzenia układów służących do

generowania dźwięku u człowieka, co może negatywnie odbić się na stanie psychofizycznym pacjenta.

Rozdział czwarty opisuje badania, które jednoznacznie dowodzą, że niskoczęstotliwościowe drgania mogą pozytywnie wpływać na stan zdrowia osób, które są na działanie tych drgań wystawione. Jednym z efektów przeprowadzonych badań nad wpływem treningu drganiami ogólnymi WBV (wibracja całego ciała) o częstotliwości 3,2 Hz było wykazanie wpływu na wybrane parametry funkcjonalne organizmu człowieka.

Opisane badanie przeprowadzono w dwóch etapach: grupa eksponowana drganiami oraz grupa kontrolna. Grupa eksponowana (28 kobiet) uczestniczyła w 19-stu dwudziestominutowych treningach drganiami ogólnymi niskiej częstotliwości (pozycja stojąca, częstotliwość około 3,2 Hz) o stałej porze dnia dla każdej osoby. Przed i po ekspozycji drganiami wykonywano pomiary wybranych parametrów funkcjonalnych. Grupa kontrolna (33 kobiety) uczestniczyła również w 19 codziennych dwudziestominutowych spotkaniach, w czasie których wykonywano pomiary i nie stosowano drgań. Otrzymane wyniki poddano analizom statystycznym w środowisku Statistica.

W analizach statystycznych przyjęto poziom istotności $p=0,05$, stosowano parametryczny test T lub nieparametryczny test Kołmogorowa–Smirnowa dla dwóch grup zmiennych niezależnych.

Przeprowadzone badania i wykonane analizy wskazują, że niskoczęstotliwościowe wibracje całego ciała WBV (o ściśle określonych parametrach) są ekwiwalentem wysiłku fizycznego pozbawionym niedogodności związanych z przeciążeniem narządu ruchu, co z punktu widzenia trybu życia współczesnego człowieka cierpiącego na chroniczny niedobór ruchu jest (powinno być) interesujące. Można je stosować w zapobieganiu i/lub rehabilitacji wielu chorób cywilizacyjnych m.in.: otyłości (spadek masy ciała i zawartości tkanki tłuszczowej), osteoporozy (wzrost stabilności postawy - zmniejszenie zagrożeń przed upadkiem i złamaniami), nadciśnienia tętniczego i niedoboru ruchu (pozytywny wpływ na układ krwionośny). Ekspozycja na drgania może być nową formą codziennego treningu, który prowadzi do utrzymania organizmu w odpowiedniej kondycji fizycznej co jest korzystne zwłaszcza u osób starszych. Może być też pomocna w utrzymaniu dobrej kondycji psychicznej ponieważ prowadzi do wzrostu poziomu aktywacji, a co za tym idzie do poprawy jakości życia człowieka.

Dźwięk szkodzi W rozdziale piątym opisana została metoda modelowania hałasu aerodynamicznego, która pozwala na uzyskanie informacji na temat wpływu parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych maszyny przepływowej jaką jest wentylator, na poziom emitowanego do otoczenia hałasu. Ponieważ wentylatory są najbardziej rozpowszechnionymi urządzeniami w przemyśle niewielka zmiana ich sprawności czy hałaśliwości da duże efekty dla środowiska. W związku z tym autorzy podjęli temat modelowania emisji akustycznej wentylatora osiowego. Do modelowania wyko-

rzystano metodę hybrydową – numeryczne rozwiązanie uśrednionych w czasie równań Naviera–Stokesa prowadziło do uzyskania pola uśrednionych prędkości i ciśnień. Przyjęty model nieściśliwy płynu. Ze względu na jego dobre zachowanie w obecności dużych wartości gradientu ciśnienia i prędkości wykorzystano model turbulencji $k-\omega$ SST. Obliczenia aeroakustyczne przeprowadzono metodą SNGR, która polega na wyznaczeniu takiego pola chwilowych prędkości, które ma widmo odpowiadające teorii Kołmogorowa i jednocześnie zachowuje odpowiednią energię kinetyczną turbulencji. Na podstawie chwilowego pola prędkości i ciśnień wyznaczono źródła akustyczne, a następnie rozwiązano problem propagacji fali generowanej przez te źródła. Do rozwiązania problemu propagacji wykorzystano metodę elementów skończonych.

Ostatni rozdział opisuje przeprowadzone badania dotyczące klimatu akustycznego przejść dla zwierząt. Górne przejścia dla zwierząt, budowane nad traktami komunikacyjnymi mają istotne znaczenie dla bioróżnorodności, a co za tym idzie dla komfortu życia ludzi.

Z tego powodu podjęto badania nad tym, jakie warunki panują na tych przejściach. Wskazano możliwości poprawy stanu obecnego, podano w jaki sposób można uzupełnić wyniki badań.

Przeprowadzone badania pozwalają potwierdzić znaną tezę, że hałas może degradować życie nie tylko ludzi, ale też i zwierząt. A zwiększająca się świadomość tego, że ekosystem tworzy pewną spójną całość prowadzi do tego, że podejmowane są działania mające na celu jeszcze lepszą ochronę tego dziedzictwa.

Po tym krótkim zaprezentowaniu treści niniejszej monografii, można stwierdzić, że całość wpisuje się w istotę rzadko dziś używanego pojęcia, które stworzył profesor Walery Goetel. Ów zasłużony pracownik Akademii Górniczo-Hutniczej był twórcą nowej nauki – sozologii, czyli nauki o czynnej ochronie środowiska naturalnego, twierdził, że co przemysł zniszczył, to przemysł powinien naprawić.

Podobnie inny, zasłużony człowiek, jakim był profesor Zbigniew Engel, który wypromował wibroakustykę jako interdyscyplinarną naukę, dającą możliwość analizowania zjawisk związanych z oddziaływaniem i generowaniem fal akustycznych w spójny sposób.

Oddając do rąk czytelników tą monografię mamy nadzieję, że przynajmniej w części pomoże ona dostrzec istotność problemów związanych z dźwiękiem, który: informuje, leczy a czasem szkodzi.

Rozdział 1

Wpływ warunków pracy na parametry diagnostyczne maszyn

1.1. Wprowadzenie

Diagnostyka wibroakustyczna to dział techniki, w którym dźwięk i drgania pełnią niezwykle ważną rolę. Są nośnikiem informacji. Stąd też niniejszy rozdział nawiązuje do pierwszej części tytułu monografii.

W diagnostyce wibroakustycznej bardzo często ma się do czynienia z maszynami pracującymi w zmiennych warunkach. Co znacznie utrudnia ich diagnozowanie standardowymi metodami diagnostycznymi, ponieważ wartości wyznaczanych estymat zmieniają się wraz z obciążeniem. W takich przypadkach, w metodach widmowych wymagana jest analiza pasm częstotliwości, które oprócz informacji o diagnozowanym parametrze zawierać mogą inne składowe. Zastosowanie metody analizy rzędów pozwala na zsynchronizowanie sygnału wibroakustycznego z prędkością obrotową, co rozwiązuje ten problem i ułatwia śledzenie amplitud składowych odpowiedzialnych za konkretny element maszyny. Zmienne warunki pracy wpływają również na zmiany amplitud składowych charakterystycznych, co jest przedmiotem tej pracy.

Obecnie w literaturze znaleźć można coraz więcej metod oceny stanu technicznego przekładni, szeroki przegląd obecnie stosowanych metod diagnozowania przekładni planetarnych można znaleźć w pracy [1]. Dla maszyn pracujących ze zmienną prędkością obrotową zalecane jest stosowanie metod analizy sygnałów niestacjonarnych. Metody analizy sygnałów niestacjonarnych generowanych przez maszyny wirnikowe były już znane w latach 80-tych, sposoby ich implementacji można znaleźć w pracach [2, 3]. Metody te polegają na synchronicznym próbkowaniu sygnałów pomiarowych, gdzie zmienna częstotliwość próbkowania zależy od sygnału prędkości obrotowej diagnozowanej maszyny. Obecnie rozwiązane również rozwijane są metody diagnozowania maszyn polegające na synchronizacji sygnału diagnostycznego z prędkością obrotową metodą podpróbkowania (ang. *subsamplingu*) [4–6] czy też przy użyciu transformacji Gabora [7, 8].

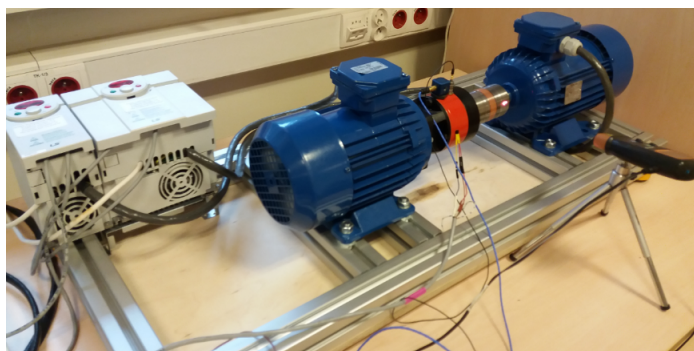
W większości przypadków zmiana prędkości obrotowej spowodowana jest zmianą obciążenia, więc wraz ze zmianą wartości częstotliwości charakterystycznych zmieniają się również ich amplitudy. W związku z tym oprócz synchronizacji sygnałów z prędkością obrotową należy również uzależnić amplitudy parametrów diagnostycz-

nych od obciążenia. W pracy [9] autorzy wyznaczyli zależności amplitud rzędów w zależności od prędkości obrotowej dla różnych poziomów obciążenia, co znacznie poprawiło skuteczność diagnozowania, z kolei w pracach [10, 11] wykorzystano metody sztucznej inteligencji do diagnozowania maszyn pracujących przy zmiennym obciążeniu. Spotkać się można również z zastosowaniem złożonego wnioskowania Bayesa [12] do detekcji rodzaju uszkodzenia dla różnych wariantów obciążenia i prędkości obrotowych.

W niniejszym rozdziale monografii przedstawiono analizę wpływu obciążenia diagnozowanego układu na wartości parametrów diagnostycznych przekładni planetarnej na stanowisku laboratoryjnym. Przeprowadzono eksperyment diagnostyczny maszyny pracującej w zmiennych, zadanych warunkach pracy. Analizowano wartości amplitud rzędów charakterystycznych oraz ich zmiany w zależności od zadawanego obciążenia.

1.2. Eksperyment diagnostyczny

Stanowisko laboratoryjne, pokazane na rysunku 1.1, składa się z przekładni planetarnej, silnika napędzającego, silnika stanowiącego obciążenie oraz dwóch przetworników częstotliwości, które sterowane są za pomocą karty pomiarowej. Wykorzystanie karty z wyjściami analogowymi pozwala na zadanie dowolnej funkcji momentu obciążenia przekładni.



Rys. 1.1. Stanowisko laboratoryjne

Wprowadzono dwa uszkodzenia układu. Pierwszym z nich było nieprawidłowe posadowienie silnika zwane w diagnostyce „luźną łapą” (ang. *soft foot*). Zostało ono zrealizowane poprzez odkręcenie nakrętki przy łapie silnika napędzającego przekładnię. Drugim wprowadzonym uszkodzeniem było wprowadzenie nieosiowości układu,

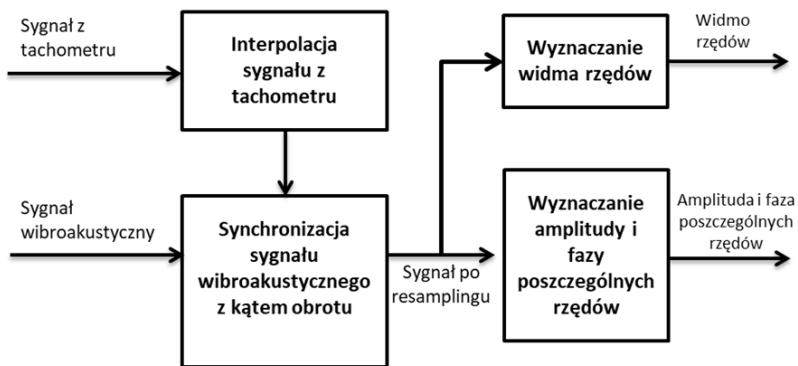
zrealizowane poprzez podłożenie dwóch podkładek o grubości 1 mm pod tylne łąpy silnika napędzającego przekładnię.

W celu przeprowadzenia analizy wpływu warunków pracy na badany układ, wprowadzono zmienne obciążenie o charakterze sinusoidalnym o wartości maksymalnej równej 3,9 Nm a minimalnej 1,8 Nm.

1.3. Metoda analizy sygnałów

Przeprowadzono pomiar przyspieszenia drgań na korpusie przekładni oraz pomiar prędkości obrotowej z wykorzystaniem tachometru z wyjściem analogowym. Sygnał z tachometru posłużył do omówionej w dalszej części analizy synchronicznej.

Do analizy sygnałów wykorzystano metodę analizy rzędów, której jednym z rezultatów jest widmo rzędów. Wyznaczane jest ono metodą opartą o zmianę częstotliwości próbkowania (ang. *resampling*) sygnału czasowego drgań względem prędkości obrotowej wału wejściowego. Na rysunku 1.2 przedstawiono schemat algorytmu analizy rzędów. W pierwszej fazie sygnał z tachometru jest poddawany procedurze interpolacji za pomocą filtru kaskadowo-grzebieniowego (ang. *cascaded integrator-comb* — *CIC*). Następnie na podstawie przefiltrowanego sygnału z tachometru przeprowadzana jest procedura resamplingu sygnału drgań w celu wyznaczenia sygnału drganiowego względem kąta obrotu (ang. *Even Angle Signal*). Tak przepróbkowany sygnał można poddać szybkiej transformacji Fouriera (FFT). Po przeprowadzeniu takiej transformaty zamiast częstotliwości uzyskuje się numery rzędów, które odpowiadają wielokrotnościom częstotliwości obrotowej wału wejściowego [13]. Częstotliwość obrotowa wału wejściowego odpowiada rzędowi numer 1.



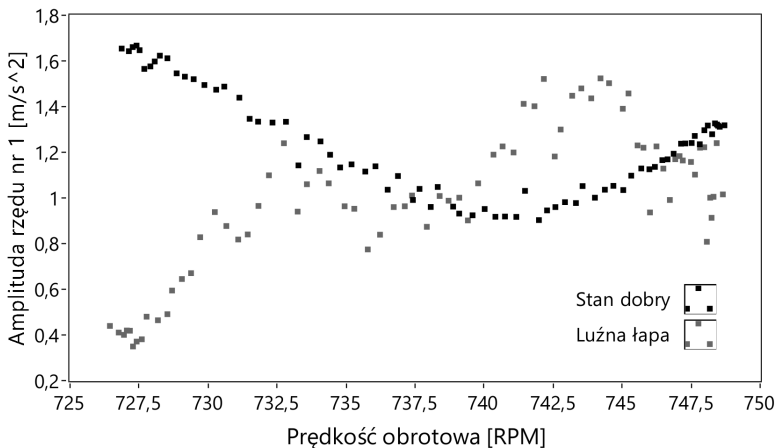
Rys. 1.2. Schemat algorytmu analizy rzędów [13]

Monitorując amplitudy rzędów charakterystycznych można uzyskać informacje o stanie technicznym badanego obiektu. Jednak zmiana wartości amplitud może być spowodowana również zmianą obciążenia układu [9]. W związku z tym należy monitorować wartości rzędów charakterystycznych w funkcji obciążenia. W analizowanym przypadku zmiany prędkości obrotowej są odwrotnie proporcjonalne do wartości momentu obciążenia, ponieważ silnik napędzający zasilany jest napięciem o stałej częstotliwości, zmiany obciążenia zadawane są poprzez zmniejszanie wartości częstotliwości napięcia zasilającego drugi silnik.

1.4. Wyniki analizy sygnałów

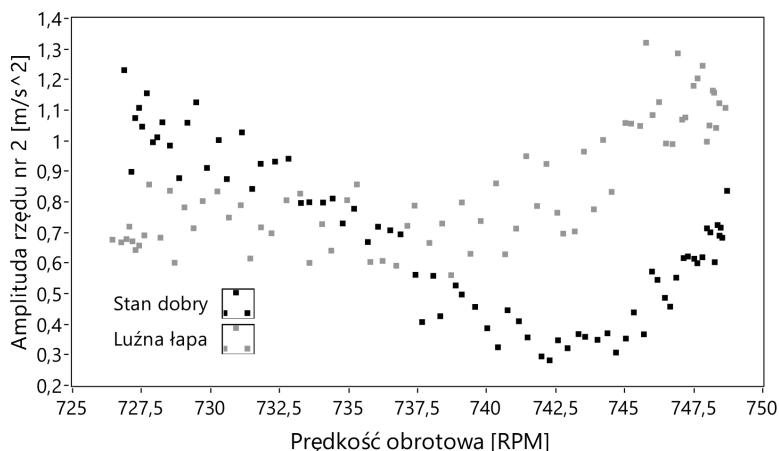
Jak już wcześniej wspomniano, na stanowisku laboratoryjnym zostały wprowadzone dwa uszkodzenia: nieprawidłowe posadowienie silnika (luźna łąpa) oraz niewspółosiowość wału wyjściowego przekładni z silnikiem obciążającym układ. Niepoprawne posadowienie silnika, czyli w tym przypadku odkręcenie jednej z nakrętek mocujących można zdiagnozować monitorując amplitudę pierwszej i drugiej harmonicznej prędkości obrotowej [14].

Na rysunku 1.3 przedstawiono amplitudę rzędu nr 1 w funkcji prędkości obrotowej, która zmieniała się od wpływem obciążenia, dla układu sprawnego (kolor czarny) oraz dla układu z poluzowaną łąpą silnika napędzającego (kolor szary).



Rys. 1.3. Amplituda rzędu nr 1 w funkcji prędkości obrotowej, która zmieniała się od wpływem obciążenia, dla układu sprawnego (kolor czarny) oraz dla układu z poluzowaną łąpą silnika napędzającego (kolor szary)

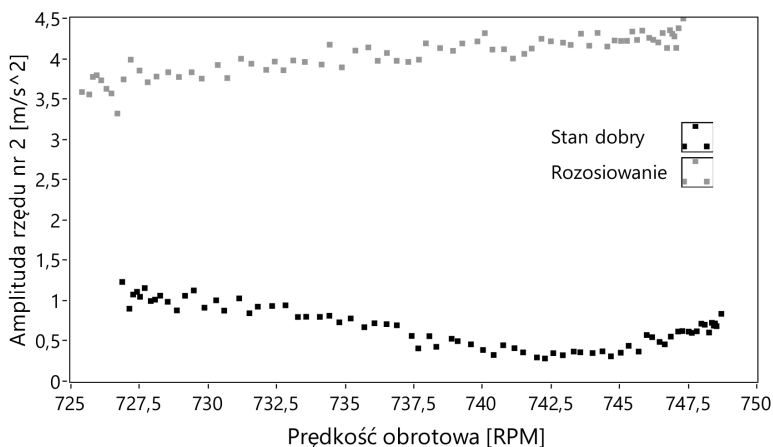
Przy analizie wartości średniej amplitudy rzędu nr 1 (co często występuje w systemach monitorowania) uszkodzenie nie zostałoby wykryte, ponieważ dla stanów z uszkodzeniem i bez, średnia wartość amplitudy wynosi $1,1 \text{ m/s}^2$. Jednak analizując wartość amplitudy w funkcji obciążenia zaobserwować można znaczące różnice w kształcie zależności amplitudy rzędu w funkcji obciążenia. Podobna sytuacja występuje w przypadku analizy przeprowadzonej dla rzędu nr 2, co zostało przedstawione na rysunku 1.4.



Rys. 1.4. Amplituda rzędu nr 2 w funkcji prędkości obrotowej, która zmieniała się od wpływu obciążenia, dla układu sprawnego (kolor czarny) oraz dla układu z poluzowaną łapą silnika napędzającego (kolor szary)

Stan niewspółosiowości wałów objawia się zmianą amplitudy dla drugiej harmonicznej, a w przypadku zastosowania sprzęgła zaobserwować można wzrost amplitudy harmonicznej wynikające z liczby zębów (kłów) sprzęgła [14]. W tym przypadku zastosowano sprzęgło o liczbie kłów równej 8. Z uwagi na fakt, że niewspółosiowość występuje na wale wyjściowym przekładni o przełożeniu 4 chcąc obserwować ósmą harmoniczną jego obrotów należy analizować rząd o numerze 2, którego zależność od prędkości obrotowej przedstawiono na rysunku 1.5.

Widoczny jest ponad czterokrotny wzrost, co stanowi znaczącą różnicę w wartościach amplitud dla stanu sprawnego oraz niesprawnego. W analizowanym przypadku wprowadzono uszkodzenie poprzez podłożenie podkładek o grubości 1 mm pod tylne łapy silnika napędzającego, co stanowi znaczącą niewspółosiowość. Jednak analizując zależność amplitudy dla stanu dobrego zauważyć można zmiany od wartości $0,25 \text{ m/s}^2$ do $1,25 \text{ m/s}^2$ co w przypadku niewspółosiowości o mniejszej wartości może mieć znaczenie i tak jak w poprzednich przypadkach charakterystyki dla stanu poprawnego oraz niepoprawnego mogą na siebie nachodzić.



Rys. 1.5. Amplituda rzędu nr 2 w funkcji prędkości obrotowej, która zmieniała się od wpływu obciążenia, dla układu sprawnego (kolor czarny) oraz dla układu rozosiowanego (kolor szary)

1.5. Podsumowanie

W tym rozdziale podjęto problem oceny stanu technicznego maszyn pracujących w zmiennych warunkach. Zwrócono szczególną uwagę na zależność parametrów diagnostycznych od obciążenia badanego obiektu. Przeprowadzono czynny eksperyment diagnostyczny, w którym wykazano, że pominięcie wpływu obciążenia może mieć skutki w końcowej diagnozie stanu maszyn. Takie uproszczenie może prowadzić do błędnej oceny stanu maszyn.

Przeanalizowano dwa typy uszkodzenia: nieprawidłowe posadowienie silnika oraz niewspółosiowość wałów. W obydwu przypadkach wykazano znaczący wpływ obciążenia na analizowane parametry diagnostyczne.

Uwzględnienie zmian wartości parametrów w zależności od obciążenia układu może być kluczowe w początkowych stadiach uszkodzeń lub w przypadku uszkodzeń generujących drgania o stosunkowo małych amplitudach.

Przy analizie stanu badanych maszyn bazowano na amplitudach rzędów wyznaczonych z wykorzystaniem analizy rzędów, która pozwala na precyzyjne monitorowanie składowych harmonicznych sygnału wibroakustycznego maszyn pracujących przy zmiennych prędkościach obrotowych.

Poznanie stanu maszyny jest bardzo istotne dla każdego inżyniera. Podobnie dla wielu grup ludzi zajmujących się sygnałami akustycznymi bardzo ważna jest wiedza o rozkładzie parametrów pola akustycznego w jakimś ograniczonym obszarze – o tym stanowi kolejny rozdział.

Rozdział 2

System pomiarowy do badania parametrów pola akustycznego

2.1. Wprowadzenie

Pole akustyczne może być nośnikiem informacji. Można też poszukiwać informacji na temat rozkładu pola akustycznego.

Pole akustyczne w pomieszczeniu można opisać na podstawie badań eksperymentalnych lub stosując wybraną z metod obliczeniowych. W literaturze można znaleźć metody analizy sygnałów akustycznych zmierzonych przy zastosowaniu macierzy mikrofonowych [15–17]. Podstawowe parametry opisujące pole akustyczne to: prędkość drgań cząstek akustycznych v oraz ciśnienie akustyczne p w danym punkcie pola. Pierwszy z nich jest wielkością wektorową, drugi wielkością skalarną. Równania ciśnienia akustycznego i prędkości drgań można zapisać przy pomocy wprowadzonego przez Lagrange’a potencjału akustycznego Φ ,

$$p = \rho_0 \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\vec{v} = -\nabla \Phi \quad (2.2)$$

gdzie ∇ jest operatorem nabla, zaś ρ_0 jest gęstością ośrodka, w którym rozchodzi się fala akustyczna.

Działając obustronnie operatorem nabla na równanie (2.1) i wykorzystując równanie (2.2) uzyskuje się zależność między wektorem prędkości drgań a gradientem ciśnienia akustycznego:

$$\nabla p = -\rho_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \quad (2.3)$$

Cechą ruchu falowego jest współzależność między rozchodzeniem się w przestrzeni zaburzeń stanu równowagi ośrodka a zmianami tych zaburzeń w czasie. To oznacza, że przebiegom czasowym zachodzącym w punkcie obserwacji odpowiadać będzie określony rozkład przestrzenny parametrów pola akustycznego. Stan akustyczny pomieszczenia opisuje równanie falowe. Rozwiązanie tego równania, z zastrzeżeniem

odpowiednich warunków początkowych i brzegowych, prowadzi do wyznaczenia wyrażenia dla wszystkich wielkości akustycznych. Zatem wykorzystując potencjał prędkości Φ , można opisać pole akustyczne równaniem falowym. W takim przypadku jego rozkład czasowo-przestrzenny przedstawia zależność:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 \Phi \quad (2.4)$$

gdzie: c jest prędkością propagacji fali wyrażoną w [m/s].

Równanie (2.4) określa jednocześnie fale prędkości cząstki i ciśnienia akustycznego będących pochodnymi potencjału prędkości. Podstawą wyprowadzenia równania falowego są trzy prawa fizyczne: druga zasada mechaniki Newtona, zależność termodynamiczna między ciśnieniem a objętością środowiska oraz równanie ciągłości strugi [18, 20]. Parametry określające rozkład pola akustycznego stanowią rozwiązanie równania falowego. Jeżeli wartość Φ zmienia się sinusoidalnie to rozwiązanie równania (2.4) we współrzędnych sferycznych ma postać [20]:

$$\Phi(\vec{r}, t) = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (2.5)$$

gdzie A – moment źródła, r – odległość od źródła, ω to pulsacja z jaką źródło promieniuje, $\omega = kc$, zaś k to liczba falowa, $k = 2\pi/\lambda$, λ jest długością fali, $\lambda = c/f$, c to prędkość fali w ośrodku, w którym się ona rozchodzi.

Wektor \vec{r} jest wektorem wodzącym, który określa położenie punktu w przestrzeni w układzie współrzędnych sferycznych, $\vec{r} = (r, \theta, \varphi)$.

Stosunek ciśnienia akustycznego p do prędkości cząstki v dla kulistej fali dźwiękowej jest liczbą zespoloną i zależy od odległości r od źródła i od częstości $\omega = kc$. Oznacza to, że między obiema wielkościami istnieje różnica faz. Jednak dla odległości, które są duże w porównaniu do długości fali, stosunek p do v dąży asymptotycznie do impedancji charakterystycznej medium.

Z propagacją fali akustycznej w pomieszczeniu zamkniętym związanych jest szereg elementarnych zjawisk fizycznych. Dźwięk zarejestrowany w określonym punkcie pomieszczenia jest wypadkową fal akustycznych, które dotarły do tego miejsca ulegając jednemu lub wielu odbiciom. Zgodnie z zasadą Fermata każda fala wyemitowana przez źródło dociera do punktu obserwacji drogą najszybszą. Jeżeli analizowany jest ośrodek jednorodny to charakteryzuje go w całej objętości stała prędkość fali akustycznej. Odbijając się od ścian pomieszczenia następuje częściowe pochłanianie energii fali, a także przesunięcie fazy wynikające z impedancji akustycznej powierzchni ściany. O właściwościach układu przestrzennego decyduje jego kształt, ośrodek wypełniający oraz warunki brzegowe występujące na powierzchni.

Charakterystykę częstotliwościową obiektu otrzymuje się podając na wejście sygnał harmoniczny o stałej amplitudzie w kolejnych przedziałach czasowych o różnej pulsacji. Odpowiedź pomieszczenia na wymuszenie sinusoidalne o amplitudzie

X_m i pulsacji ω , $x(t) = X_m \sin \omega t$ w stanie ustalonym, czyli po zaniknięciu procesów przejściowych, jest sinusoidą o tej samej częstotliwości, ale innej amplitudzie Y_n i przesuniętą w fazie o $\phi(\omega)$ względem sinusoidy wejściowej jak przedstawiono w równaniu (2.6).

$$y(t) = Y_m |G(j\omega)| \sin[\omega t - \phi(\omega)] \quad (2.6)$$

gdzie $G(j\omega)$ jest transmitancją widmową.

Transmitancja widmowa opisuje zachowanie układu przy wymuszeniu harmonicznym dla każdej częstotliwości z badanego zakresu i jest podstawowym modelem identyfikacji stacjonarnych obiektów liniowych. W modelu tym występują dwa parametry, które stanowią wzmocnienie sygnału pobudzającego i przesunięcie fazowe.

Sygnał akustyczny w punkcie obserwacji jest superpozycją fali bieżącej i licznych fal odbitych.

2.2. Zintegrowany wielokanałowy system do pomiarów akustycznych

Dla potrzeb badań rozkładu ciśnienia akustycznego w pomieszczeniach o małej kubaturze autorzy stworzyli wielokanałowy system akwizycji sygnałów akustycznych. System ten realizuje synchroniczny pomiar ciśnienia akustycznego przez 24 mikrofony oraz pomiar prędkości drgań źródła dźwięku (membrany głośnika). Umożliwia również generowanie dowolnego sygnału napięciowego, który po wzmocnieniu przekazywany jest do źródła dźwięku. Generowane sygnały oraz sygnały pomiarowe są zsynchronizowane w czasie, co pozwala na wyznaczenie kąta przesunięcia fazowego pomiędzy mierzonymi przebiegami a sygnałem wymuszenia.

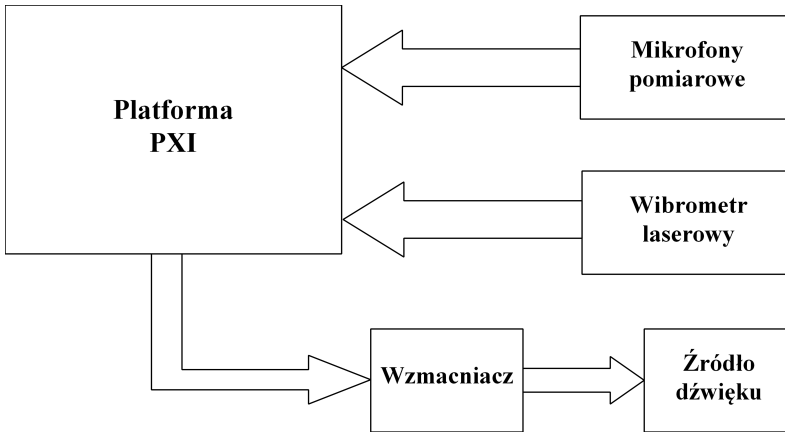
Moduły pomiarowe (karty pomiarowe, mikrofony i wibrometr laserowy) oraz generator sygnałów i źródło dźwięku zostały zintegrowane na poziomie sprzętowym. Schemat blokowy zintegrowanego wielokanałowego systemu monitoringu przedstawiono na rysunku 2.1.

Niezwykle ważną, z punktu widzenia badacza, częścią składową całego systemu jest również układ pozycjonowania mikrofonów umożliwiający przypisanie położeniu każdemu z mikrofonów współrzędnych w przestrzeni pomieszczenia.

W systemie wykorzystano platformę PXI. Jej modułowa budowa pozwala na zestawienie dowolnej konfiguracji sprzętowej, która może się składać między innymi, z urządzeń pomiarowych oraz generujących sygnały napięciowe. Do realizacji postawionych zadań dobrano następujące moduły:

- moduł nadrzędny Platforma NI PXI-8196 (kontroler),
- trzy karty pomiarowe NI PXI-4472B o następujących parametrach:
 - osiem niezależnie próbkowanych wejść analogowych,

- maksymalna częstotliwość próbkowania 102,4 kS/s,
- zakres pomiarowy ± 10 V przy rozdzielczości 24 bity;
- karta pomiarowa NI PXI-4461 o parametrach:
 - 2 wejścia analogowe o maksymalnej częstotliwości próbkowania 204,8 kS/s,
 - 2 wyjścia analogowe o maksymalnej częstotliwości próbkowania 204,8 kS/s,
 - maksymalny zakres pomiarowy $\pm 42,4$ V przy rozdzielczości 24 bity.



Rys. 2.1. Schemat pomiarowy zintegrowanego wielokanałowego systemu pomiarowego

Dla koordynacji współpracy wszystkich elementów systemu pomiarowego powstało w środowisku LabVIEW autorskie oprogramowanie pracujące w systemie operacyjnym jednostki obliczeniowej: Rejestrator Wielokanałowy oraz Analizator Widma.

Aplikacja Rejestrator Wielokanałowy ma architekturę wielowątkową, która umożliwia jednoczesny pomiar i zapis sygnałów o dowolnej długości limitowanej miejscem na dysku, podobną strukturę zastosowano w pracach [19, 21]. Standard zapisu TDMS oprócz zapisu przebiegów czasowych umożliwia dołączenie opisów zapisanych sygnałów oraz parametrów pomiaru. Aplikacja zawiera również moduły kalibracji toru pomiarowego, wyzwalania pomiaru i rejestracji danych pomiarowych, generacji sygnału na poszczególnych modułach PXI.

Pomiar ciśnienia akustycznego realizowany jest przez 24 mikrofony pomiarowe o średnicy 1/4 cala. Mikrofony te podłączone były do trzech ośmio-wejściowych kart pomiarowych typu NI PXI-4472B, które mają możliwość realizowania synchronicznego pomiaru 24 kanałów pomiarowych. Wszystkie karty taktowane są jednym zegarem próbkującym (Sample Clock Timebase) umieszczonym w karcie zainstalowanej w złączu System Timing Slot. Pomiar wyzwalany jest za pomocą magistrali PXI Trig-

ger Bus. Takie rozwiązanie pozwala na synchroniczny pomiar z użyciem wszystkich kanałów pomiarowych.

W aplikacji Rejestrator Wielokanałowy wbudowany jest moduł kalibracji wszystkich torów pomiarowych. Sprawdzenie przeprowadzane jest przez pomiar poziomu źródła wzorcowego – kalibratora połączonego ze specjalnym 6-kanałowym rozdzielnikiem pozwalającym kalibrować sześć mikrofonów jednocześnie względem amplitudy sygnału i przesunięcia fazowego sygnałów na wyjściach torów mikrofonowych. Przesunięcie fazowe sygnału sprawdzane jest względem jednego mikrofonu ustawionego na pozycji pierwszej dla wszystkich pozostałych mikrofonów użytych w torach pomiarowych. Po procesie kalibracji wartości czułości oraz przesunięcia fazy dla wszystkich mikrofonów pomiarowych można zapisać do pliku konfiguracyjnego.

Analiza zarejestrowanych sygnałów pomiarowych prowadzona jest z użyciem oddzielnej aplikacji Analizator Widma. W tej aplikacji zaimplementowane zostały funkcje analizy pasmowej wybranego sygnału dla pasm częstotliwości o szerokościach: 1/24 oktawy, 1/12 oktawy, 1/6 oktawy, 1/3 oktawy oraz 1 oktawa. Analiza pasmowa przeprowadzana jest z parametrami określającymi: szerokość pasma, zastosowane cyfrowe filtry korekcyjne A, B, C lub liniowy, metodę uśredniania oraz zakres analizowanego pasma częstotliwościowego. Można przeprowadzić analizę widmową sygnału w wybranym zakresie pasma częstotliwościowego, wyznaczyć charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe oraz fazowo-częstotliwościowe. Wynikiem analizy są pliki z zapisanymi wartościami skutecznego ciśnienia akustycznego wraz z wyznaczonymi przesunięciami fazowymi zarejestrowanych sygnałów, a także pomiar prędkości drgań membrany źródła sygnału akustycznego. Program jest kompatybilny z wcześniej opisanym Rejestratorem Wielokanałowym.

W aplikacji Analizator Widma została zaimplementowana możliwość wyboru selektywnej lub automatycznej analizy widmowej wszystkich plików pomiarowych wygenerowanych przez program Rejestrator Wielokanałowy. Program rozpoznaje rodzaj wymuszenia akustycznego.

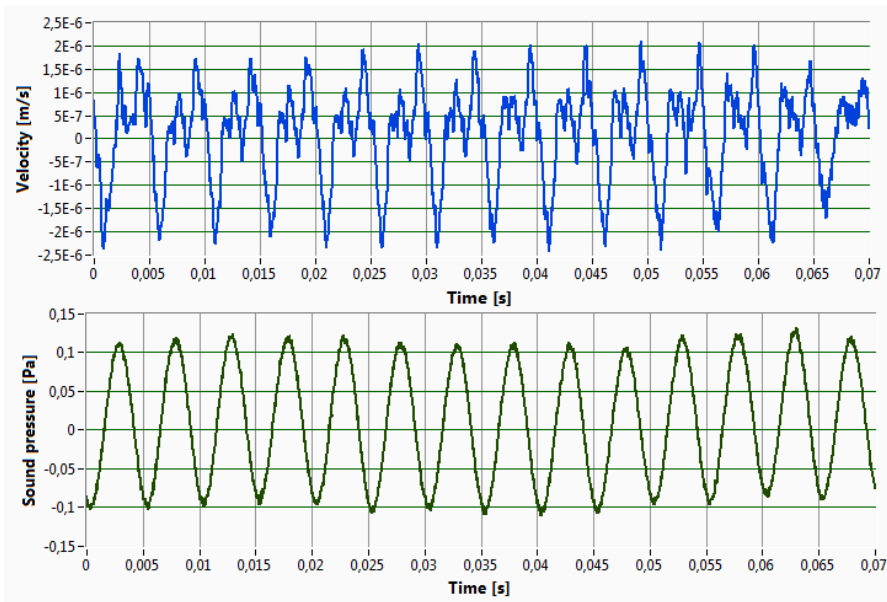
Dla sygnałów zmierzonych podczas wymuszenia szumem gaussowskim przeprowadzana jest analiza amplitudowo-częstotliwościowa oraz fazowo-częstotliwościowa odniesiona do wcześniej zadeklarowanego kanału pomiarowego.

Przy rejestracji sygnału o długości $t = 10$ s (dla $f_s = 44\,100$ Hz, $N = 441\,000$) wyznaczane jest widmo amplitudowo-częstotliwościowe oraz fazowo-częstotliwościowe z rozdzielczością $\Delta f = 0,1$ Hz, co wynika z zależności:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (2.7)$$

gdzie f_s jest częstotliwością próbkowania sygnału, natomiast N to liczba próbek w oknie czasowym.

Dla sygnałów zmierzonych przez mikrofony pomiarowe przy wymuszeniu sinusoidalnym, w analizie harmoniczej wyznaczane są wartości skuteczne ciśnienia akustycznego, a także wartości prędkości drgań membrany głośnika, co pokazano na rysunku 2.2. Amplituda prędkości drgań powierzchni membrany głośnika mierzona jest wibrometrem laserowym, którego promień skierowany jest na środek kopuły membrany. Sygnał z wibrometru zsynchronizowany jest z torem pomiarów ciśnienia akustycznego.



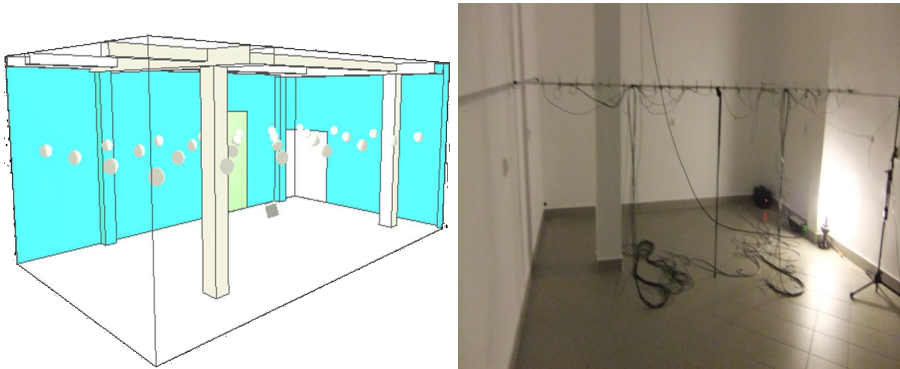
Rys. 2.2. Zarejestrowane sygnały prędkości membrany i przebiegu ciśnienia akustycznego mikrofonem numer 1

W trakcie analizy rejestrowanych sygnałów wyznaczane jest również ich przesunięcie fazowe dla każdego mikrofonu względem sygnału pomiaru prędkości drgań. Metodyka wyznaczenia przesunięcia fazowego polega na wyznaczeniu podstawowej harmoniczej sygnału prędkości drgań membrany, a następnie wyznaczany jest kąt przesunięcia fazowego pomiędzy tą składową a składową o tej samej częstotliwości występującą w sygnałach zarejestrowanych mikrofonami pomiarowymi. Należy wspomnieć, że 24-bitowa architektura kart pomiarowych NI PXI-4472B zastosowanych w pomiarach ciśnienia akustycznego, pozwala na rejestrację sygnałów z dynamiką 110 dB.

2.3. Badania rozkładu ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu testowym

Przy pobudzeniu pomieszczenia sygnałem harmonicznym o stałej amplitudzie, amplituda i faza dźwięku w punkcie obserwacji zależą w złożony sposób od częstotliwości, wymiarów pomieszczenia i położenia źródła dźwięku względem punktu obserwacji. W dźwięku zarejestrowanym w pomieszczeniu zakodowane są informacje o jego własnościach akustycznych.

Weryfikację działania układu pomiarowego przeprowadzono w pustym pomieszczeniu prostokątnym o wymiarach 6,6 x 3,9 x 2,85 m, którego zdjęcie oraz model geometryczny przedstawiono na rysunku 2.3. Wewnątrz obszaru umieszczone było źródło dźwięku emitujące sygnał fali sinusoidalnej o zadanej częstotliwości oraz szum biały. Linia 24 mikrofonów rozmieszczonych w równych odległościach była przesuwana w płaszczyźnie poziomej o jednakową odległość pokrywając płaszczyznę pomiarową równomierną siatką punktów. Pomiar prowadzony był w czasie na tyle długim, by w badanym obszarze ustalił się stan równowagi, czyli pole akustyczne o ustalonym rozkładzie przestrzennym. Wielkością obserwowaną była również prędkość drgań membrany głośnika mierzona wibrometrem laserowym.



Rys. 2.3. Pomieszczenie, w którym przeprowadzono badania eksperymentalne

Uwzględniając zmienność w czasie drgań membrany wyrażonej wartościami skutecznymi prędkości, wprowadzone zostało skalowanie zmierzonych wartości ciśnienia akustycznego [22]. Skalowanie wykonano dzieląc wartość skuteczną zmierzonego ciśnienia akustycznego p_i przez wartość skuteczną prędkości drgań źródła v_z , jak pokazano na rysunku 2.4. Zakładając, że przebiegi czasowe prędkości drgań membrany i ciśnienia akustycznego wewnątrz obszaru obserwacji można zapisać równaniami:

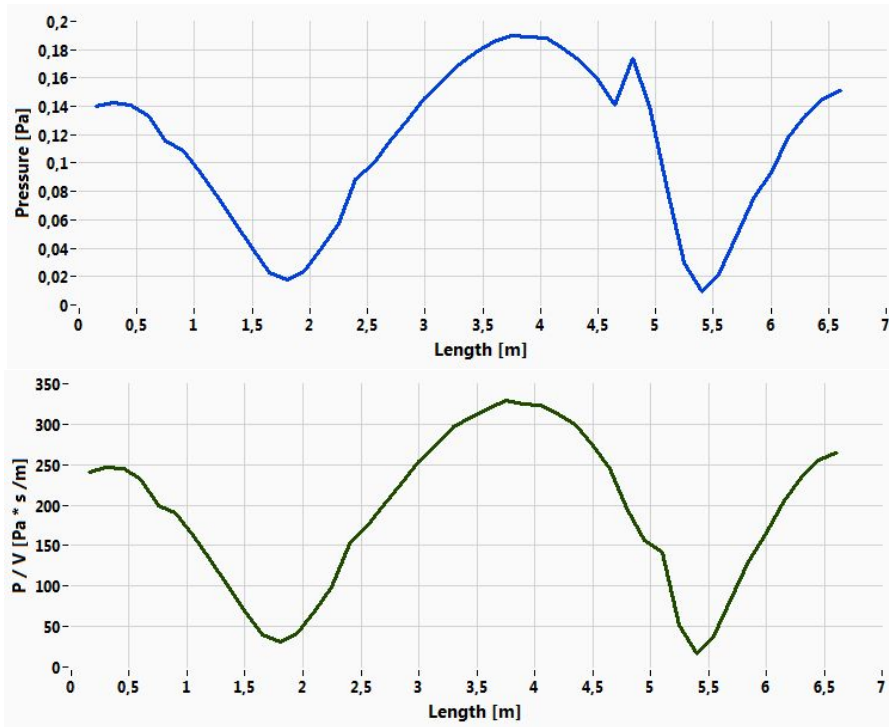
$$v_z = V_z e^{j\omega t + \theta_v} \quad (2.8)$$

$$p_i = P e^{j\omega t + (\theta_p - \theta_v)} \quad (2.9)$$

W stanie ustalonym czynnik czasowy może być pominięty i przeskalowana wartość ciśnienia akustycznego p będzie równa

$$p = \frac{P e^{j\omega t + (\theta_p - \theta_v)}}{V_z e^{j\omega t + \theta_v}} = \frac{P}{V_z} e^{\theta_p} \quad (2.10)$$

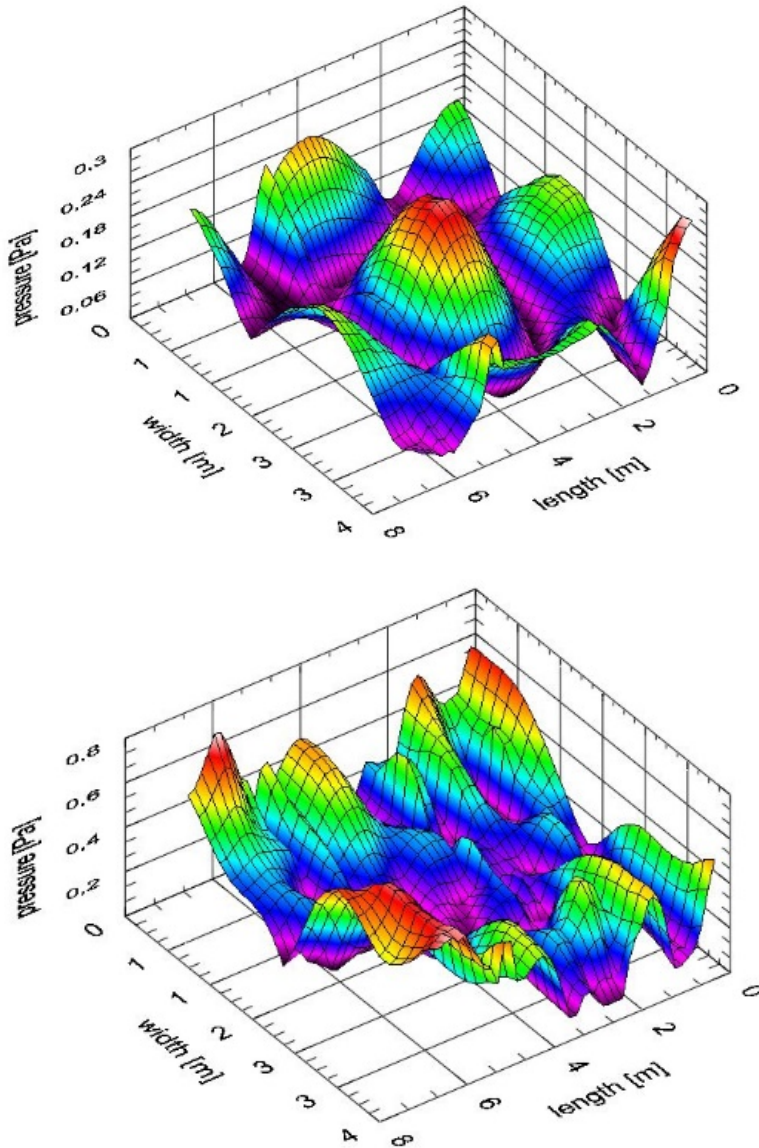
gdzie P jest amplituda ciśnienia akustycznego w [Pa], V_z to amplituda prędkości drgań membrany głośnika wyrażona w [m/s], θ_p to wartość zmierzona kąta przesunięcia fazowego ciśnienia akustycznego w radianach, zaś θ_v jest wartością początkową kąta przesunięcia fazowego prędkości drgań membrany również wyrażoną w radianach.



Rys. 2.4. Wartości ciśnienia akustycznego dla linii mikrofonów przed i po skalowaniu przez wartość prędkości drgań źródła

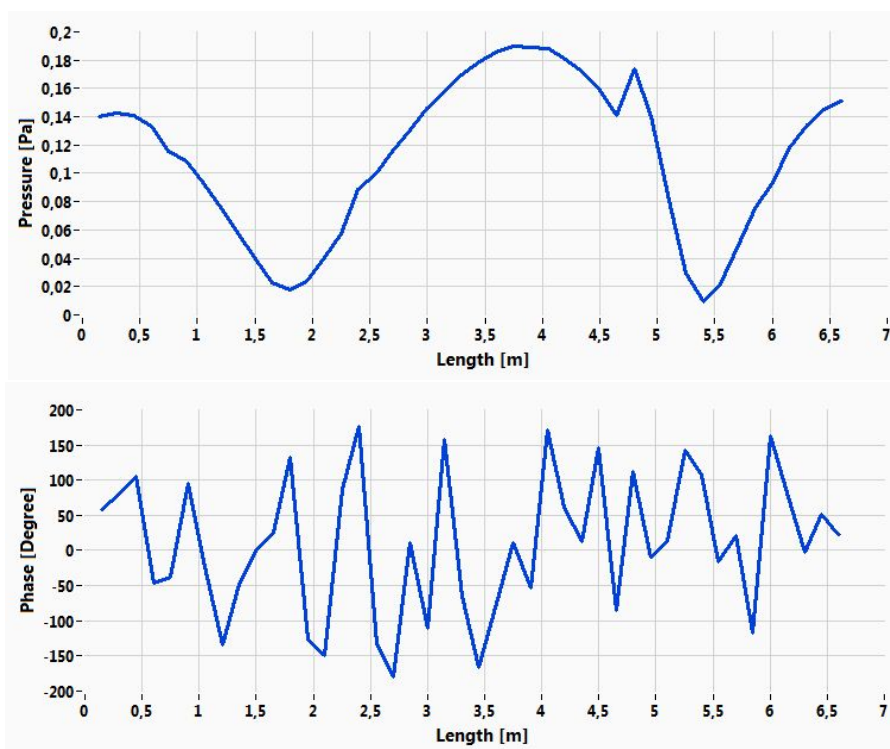
Zastosowanie systemu wielokanałowej akwizycji sygnałów pomiarowych umożliwia analizę pola akustycznego w wielu aspektach, zarówno akustyki technicznej jak i inżynierii dźwięku. W pracach [23–25] niezbędne dane wykorzystane do dalszych obliczeń pozyskano, dzięki zastosowaniu opisanego systemu. Jedną z podstawowych funkcji ma weryfikacja modeli pola akustycznego utworzonych dla potrzeb predykcji rozkładów parametrów akustycznych. Na rysunku 2.5 przedstawiono rozkład poziomów ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu dla wybranych pasm częstotliwości

100 Hz i 200 Hz zmierzone w płaszczyźnie umieszczonej na wysokości 1,5 m nad poziomem podłogi przy pobudzeniu sygnałem generatora fali sinusoidalnej z głośnika umieszczonego w narożu pomieszczenia.



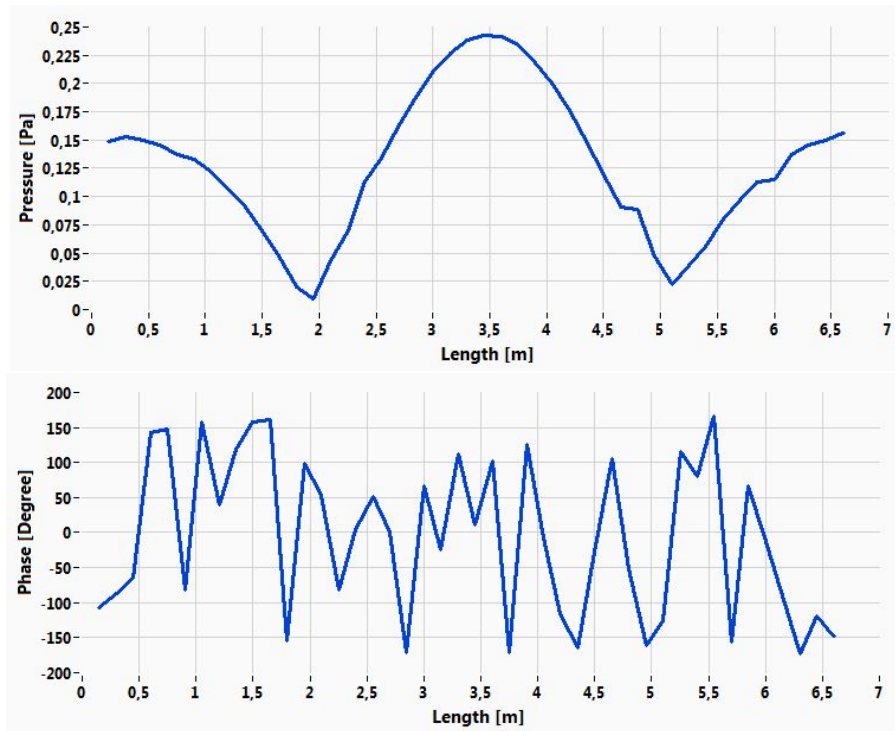
Rys. 2.5. Rozkłady ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu – badania eksperymentalne, u góry dla $f=100$ Hz, poniżej dla $f=200$ Hz

W pomieszczeniach o niewielkiej kubaturze amplitudy fal odbitych mogą być porównywalne z amplitudami fal bezpośrednich. Z tego wynika, że wkład każdej fali zarówno bezpośredniej jak i odbitych jest równie prawdopodobny. Niewielkie opóźnienia czasowe fal odbitych dla niskich częstotliwości powodują mniejsze możliwe przesunięcia fazowe. Na rysunku 2.6 przedstawiono rozkłady ciśnienia akustycznego w pobliżu ściany dłuższej (w odległości 22 cm od ściany) pod rozkładami ciśnienia są wykreślone wyznaczone zmiany fazy sygnału między punktami pomiarowymi. Na rysunku 2.7 przedstawiono przebiegi ciśnienia akustycznego i faz i w płaszczyźnie środkowego przekroju pomieszczenia.



Rys. 2.6. Rozkład ciśnienia akustycznego oraz fazy sygnału w pobliżu dłuższej ściany pomieszczenia

Omówiony w tym rozdziale system pomiarowy umożliwia wykonanie pomiarów akustycznych w różnych konfiguracjach siatki pomiarowej i zastosowanych przetworników, dostosowując metodykę pomiaru do własnych potrzeb badawczych.



Rys. 2.7. Rozkład ciśnienia akustycznego oraz fazy sygnału w środkowej płaszczyźnie pomieszczenia

2.4. Podsumowanie

Wielokanałowy zintegrowany system akwizycji i analizy sygnałów wibroakustycznych powstał przede wszystkim dla celów wyznaczania rozkładów parametrów pola akustycznego w badanych przestrzeniach. W fazie przygotowań systemu zdefiniowano żądane wielkości pomiarowe, czyli uśrednione amplitudy ciśnienia akustycznego, kąt przesunięcia fazowego pomiędzy poszczególnymi rejestrowanymi sygnałami akustycznymi oraz prędkość drgań membrany źródła. Następnie sformułowano wymagania związane z konfiguracją toru pomiarowego, pozycjonowaniem mikrofonów pomiarowych i oprogramowaniem pomiarów, zapisu i analizy sygnałów pomiarowych. Zaimplementowane zostały główne metody analizy akustycznych sygnałów pomiarowych.

Struktura i oprogramowanie wielokanałowego systemu umożliwia jego rozbudowę o kolejne karty pomiarowe połączone z odpowiednimi przetwornikami a także proste dostosowanie do nowych wyzwań badawczych. Dane pomiarowe zapisywane są w postaci przebiegów czasowych ciśnienia akustycznego, dając możliwość wielo-

krotnych analiz po każdej modyfikacji programu analizującego. Przedstawione graficzne ilustracje rozkładu parametrów akustycznych pola są prezentacją możliwości wizualizacji wyników badań.

Oprogramowanie przygotowane w środowisku LabVIEW umożliwiło utworzenie aplikacji wykorzystywanych w specjalistycznych pomiarach akustycznych. Zbudowano narzędzia, które dzięki modułowej strukturze mogą być dostosowywane do nowych zadań, rozszerzane o nowe elementy, co stanowi o przydatności powstałego systemu do zaawansowanych pomiarów akustycznych np. systemy monitoringu hałasu, układy aktywnej redukcji hałasu i inne. Otwarty kod źródłowy oraz autorskie zapotrzebowanie na specjalistyczne analizy akustyczne tworzą z opracowanych pakietów programowych w pełni rozwojowe narzędzie badawcze.

Oprócz wiedzy na temat rozkładu pola akustycznego, można sygnał akustyczny – dźwięk – potraktować jak nośnik informacji i wykorzystać go do diagnostyki medycznej. Następny rozdział stanowi pomost między zagadnieniami związanymi z informacyjną rolą fali akustycznej a zagadnieniami zdrowotnymi.

Rozdział 3

Obrazowanie mowy zdeformowanej

3.1. Wprowadzenie

Dźwięk jako źródło informacji jest szczególnie ważny, gdy chodzi o wymianę informacji między ludźmi. To właśnie mowa stanowi ten czynnik, który zdecydowanie odróżnia nas od zwierząt. Dysfunkcje toru głosowego stanowią poważny problem, niestety czasem pojawiają się na skutek ratujących życie interwencji medycznych.

Analiza i rozpoznawanie sygnałów wibroakustycznych jest zaawansowaną i ciągle się rozwijającą techniką badawczą. Poszerza tradycyjny zakres badań w kierunku nowoczesnych metod informatyki i sztucznej inteligencji. Ta technika analizy dźwięku jest obecnie tak dalece rozwinięta i udoskonalona. Możliwy jest do wykrycia i pomiarzenia każdy szczegół sygnału akustycznego mowy, umożliwiając jej wielostronną analizę wraz z wizualizacją jej wyników i przebiegu ich zmienności podczas mówienia [26]. Jednakże bezpośrednia analiza tego typu przebiegów jest bardzo złożona i wymaga dużego doświadczenia, zwłaszcza w przypadku analizowania mowy zdeformowanej patologicznie. Stąd rozwijane są i wciąż wzbogacane metody automatyzacji procesów analizy i rozpoznawania sygnału mowy zdeformowanej, a wyniki tych badań są przedstawiane w licznych pracach [27, 29, 36], do których można także zaliczyć niniejszą monografię. Jednak właśnie ta doskonałość procesorów przetwarzających dźwięki (na przykład mowę) powoduje, że potrzebujący pomocy (np. lekarz, diagnostyk) zostaje skonfrontowany z ogromnym zbiorem danych liczbowych, dokładnie charakteryzujących i opisujących badany sygnał – z których jednak nic konkretnego dla niego nie wynika.

Bibliografia dziedziny komputerowych metod przetwarzania, analizy i rozpoznawania różnych obrazów dźwiękowych jest bardzo bogata, a liczbę prac, jakie powstały na świecie w kontekście problemu rozpoznawania mowy można szacować na dziesiątki tysięcy pozycji. Zatem co nowego i oryginalnego trzeba koniecznie wskazać w stosunku do tej niesłychanie bogatej i urozmaiconej bibliografii przedmiotu [29, 41, 42].

Istotną cechą nowoczesnego *społeczeństwa informacyjnego*, którego zręby usiłujemy w Polsce zbudować, jest to, że w coraz większej liczbie sytuacji komunikacja za pomocą sygnału mowy musi zachodzić pomiędzy ludźmi, którzy nie znają się wcześniej oraz nie mają ze sobą bezpośredniego kontaktu. Powoduje to, że sygnał mowy,

jako nośnik informacji staje się coraz ważniejszy. Mowa jako sygnał akustyczny jest jednym z najbardziej powszechnych i efektywnych środków porozumiewania i komunikacji między ludźmi, chociaż postęp cywilizacji prowadzi ostatnio także do wzrostu znaczenia komunikacji opartej na piśmie także w sytuacjach życia codziennego (sms, email itp.). Jednak w dobie rozwoju wszelkich dziedzin profesjonalnej działalności przebiegającego w taki sposób, że przy wykonywaniu prawie wszystkich zawodów częstotliwość i intensywność kontaktów międzyludzkich (bazujących głównie na sygnale mowy) znacząco wzrosła – wzrosła także rola prawidłowej artykulacji mowy. Rola tego środka komunikacji zwiększyła się dodatkowo za sprawą rozwoju telefonii mobilnej. Wspomniane okoliczności powodują, że sprawne posługiwanie się mową jest dla współczesnego człowieka jeszcze ważniejsze, niż to miało miejsce w kontaktach międzyludzkich jeszcze kilkanaście lat temu.

Dużego wymiaru nabierają w tej sytuacji kwestie deformacji mowy. Ta deformacja może uniemożliwić realizację pewnych funkcji społecznych, a także wykonywanie pewnych zawodów. Zadem niepoprawność wymowy (jako następstwo jej deformacji) staje się bardzo poważnym problemem społecznym. To zmusza do podejmowania bardziej energicznych, niż to miało miejsce uprzednio, działań zmierzających do terapii mowy patologicznej, zmierzającej do jej usprawnienia. Otwarty jest natomiast ciągle problem oceny sygnału mowy, szczególnie w celu uzyskiwania ocen przydatnych w kontekście wspomagania diagnostyki medycznej, optymalizacji terapii oraz monitorowania rehabilitacji. A tymczasem takich właśnie ocen potrzebujemy w medycynie, w szczególności gdy mamy do czynienia z wadami wymowy, które są następstwem np. zabiegów laryngologicznych, stomatologicznych, chirurgii szczękowo-twarzowej, czy też osób jękających się.

O ile w typowych badaniach dotyczących rozpoznawania mowy chodzi najczęściej o ujawnienie (poprzez wybrane parametry) semantycznych aspektów wypowiedzianego tekstu, o tyle w zadaniach diagnostyki medycznej opartej na analizie sygnału mowy patologicznie zdeformowanej, semantyczna zawartość wypowiedzi jest nieistotna (a nawet może być traktowana jako zakłócenie). Również standardowe techniki parametryzacji sygnału mowy, takie jak współczynniki predykcji liniowej czy też współczynniki cepstralne nie potrafią zadowalająco opisać specyfiki cech mowy patologicznej, ze względu na jej odmienną strukturę fonetyczną i akustyczną w stosunku do sygnału mowy prawidłowej, a także z tego powodu, że cel rozpoznawania jest w tym przypadku zupełnie inny [41,42].

Dla wszystkich osób, które zetknęły się kiedykolwiek z badaniami mowy jest jednak oczywiste, że samo rejestrowanie sygnału i jego analizowanie na płaszczyźnie ekstrakcji parametrów akustycznych – zarówno czasowych, jak i częstotliwościowych to zaledwie znikomy procent realizowanego zadania.

Biorąc za podstawę sygnał mowy patologicznej czyli mowy zdeformowanej w sto-

sunku do norm określonych przez fonetyków dla mowy prawidłowej, w proponowanych tu badaniach, których wstępne wyniki przedstawiono w niniejszej monografii, stwierdzono potrzebę zastosowania bogatszego i bardziej różnorodnego spektrum metod analizy sygnału, wizualizacji wyników oraz jego komputerowego klasyfikowania niż to, które jest rutynowo dostępne. W ramach niniejszej pracy także wykorzystywano fakt, że każdy sygnał odbierany przez człowieka zawiera dwie kategorie; informacyjną i zakłócającą. Sygnał akustyczny mowy oprócz informacji semantycznych oraz osobniczych, które z punktu widzenia deformacji patologicznych możemy potraktować jako zakłócające, nieistotne, także nieważne a nawet szkodliwe zawiera także takie cechy, które mogą być wykorzystane jako przydatne nośniki informacji dotyczącej funkcjonowania całego kanału głosowego oraz organów współpracujących w tym procesie. Najważniejszym a także najtrudniejszym elementem prac badawczych poprzedzających praktyczne wykorzystanie mowy, jako źródła użytecznej medycznie informacji diagnostycznej i prognostycznej, jest znalezienie i opisanie parametrów sygnału, które są maksymalnie niezależne zarówno od kontekstu, jak i od cech osobniczych badanego głosu. Poszukiwane cechy sygnału powinny być maksymalnie wrażliwe na jego drobne nawet deformacje w tej warstwie, która jest związana z budową i funkcjonowaniem całego kanału głosowego (krtai i przewężenia będące źródłem składników szumowych mowy) oraz ze strukturą tej części kanału głosowego, która jest wykorzystywana w trakcie artykulacji.

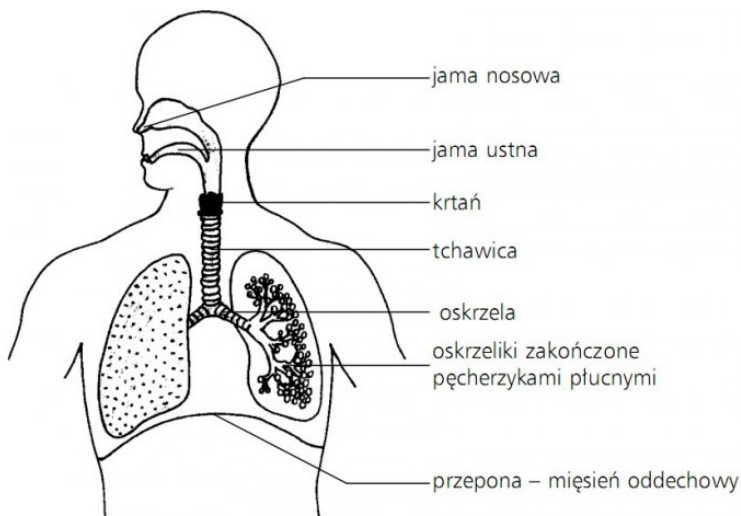
Tak więc problem niepoprawnej (patologicznej) wymowy staje się bardzo poważnym problemem społecznym. Zmusza to do podejmowania bardziej energicznych, niż to miało miejsce uprzednio, działań zmierzających do leczenia a szczególnie terapii mowy patologicznej. Ta wymieniona okoliczność uzasadnia podjęcie badań sygnału mowy zdeformowanej. Dla każdego jest jasne, jak ważną rolę dla nowych obszarów terapii mają skojarzone z nimi nowe techniki diagnostyczne.

3.2. Struktura i czynności kanału głosowego

Metody rejestracji, przetwarzania i analizy a także syntezy sygnału akustycznego mowy powinny być oparte na dokładnej znajomości procesu jego wytwarzania. Dotyczy to szczególnie mowy patologicznej. Struktura akustycznego sygnału mowy jest uzależniona od procesu jego wytwarzania. Zatem koniecznym jest dokładna znajomość budowy kanału głosowego, a także zachodzących w nim procesów towarzyszących wytwarzaniu prawidłowego i zdeformowanego głosu.

Wytwarzanie dźwięków mowy (artykulacja) jest wynikiem złożonej współpracy zespołu narządów, które wspólnie wchodzi w skład aparatu mowy. W jego budowie wyróżnia się trzy poziomy strukturalno-funkcjonalne, tj. aparat oddechowy (część motoryczna narządu głosowego), aparat fonacyjny (część głosotwórcza) oraz aparat

artykulacyjny (część rezonacyjno-artykulacyjna) [34]. Aparat oddechowy jest poziomem inicjacji sygnału, czyli źródłem energii dla potrzeb artykulacji. W jego skład wchodzi drogi oddechowe (rys. 3.1) wraz z zespołem mięśni uczestniczących w procesie oddychania.



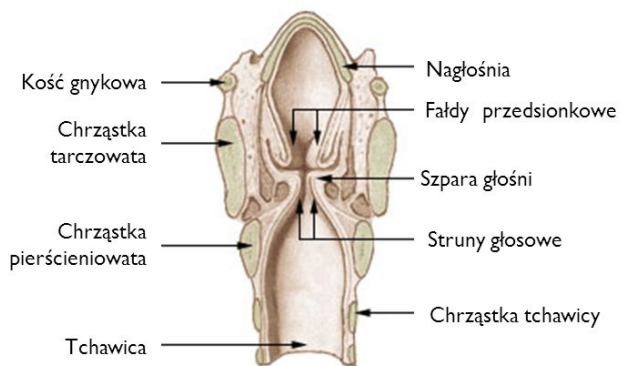
Rys. 3.1. Szkic układu oddechowego [40]

Część drogi głosowej, leżącej powyżej krtani nazywamy kanałem głosowym. Jego kształt przekroju poprzecznego zależy od ruchów języka, warg i szczęki (tzw. narządów artykulacyjnych) umożliwiając wymawianie (artykulację) różnych głosek. Powietrze zgromadzone w płucach jest poprzez oskrzela i tchawicę tłoczone do wyższych partii układu.

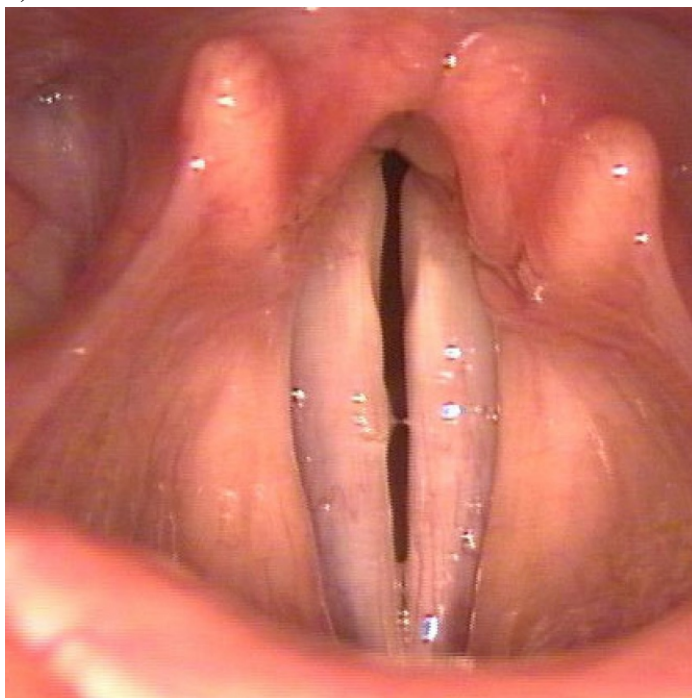
Narzędziem wytwarzania dźwięku, czyli tzw. poziom fonacji jest krtani, która jest częścią aparatu fonacyjnego. Jest ona szczególnie ważnym elementem organu mowy ze względu na swoją funkcję artykulacyjną, jako generator drgań. Umiejscowiona jest w części środkowej odcinka szyi, czyli między gardłem a tchawicą. Długość krtani dla dorosłej osoby wynosi od 4 do 6 cm. Krtani jest zbudowana ze szkieletu chrzęstnego, więzadeł i mięśni. Szkielet chrzęstny jest utworzony z 9 chrząstek, które możemy podzielić na parzyste (nalewkowate, różkowate, klinowate) i nieparzyste (tarczowata, pierścieniowata, nagłośnia).

Głównym elementem krtani zdolnym do drgań są fałdy głosowe (rys. 3.2). Są one parzystymi strukturami, w skład których wchodzi, mięśnie głosowe, więzadła głosowe, tkanka łączna, naczynia krwionośne i nerwy oraz pokrywająca je błona śluzowa. Największą część krtani jest szpara głośni (rys. 3.2). Jest to przestrzeń zawarta między fałdami głosowymi.

a)



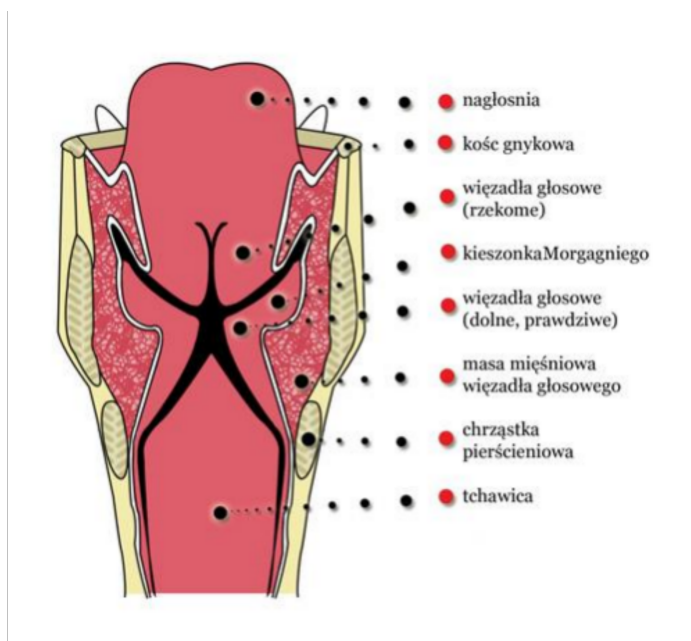
b)



Rys. 3.2. a) Jama krtani – przekrój, b) fałdy głosowe [40]

Zwieranie i rozwieranie tej przestrzeni spowodowane jest zbliżaniem i oddalaniem się fałdów głosowych. Na skutek wykonywanych tych ruchów dochodzi do wytwarzania drgań powietrza (poprzecznych do długiej osi fałdów głosowych) przechodzącego przez szparę głośni. Wewnątrz jamy krtani wprowadzone w drgania struny głosowe dają początek dźwięcznym elementom mowy (rys. 3.2a). Jej ruchy są powiązane z ruchami języka, podniebienia i zuchwy, co daje możliwość zmian kształtu i pojemności wnęk rezonacyjnych całego aparatu, a to z kolei wpływa na jakość i barwę generowanych dźwięków.

Do najważniejszych elementów narządu mowy można zaliczyć fałdy głosowe. Rozciągają się one od przodu ku tyłowi jamy krtani. Ułożone są piętrowo: w górnej części są fałdy przedsionkowe (rzekome), które nie biorą czynnego udziału w artykulacji, a jedynie wspomagają ten proces, oraz w dolnej części są rzeczywiste fałdy (struny) głosowe. Przestrzeń pomiędzy górnymi a dolnymi fałdami, nazwana jest *kieszką Morgagniego*, która bierze udział w formowaniu przestrzeni rezonansowej przedstawiono ją na rysunku 3.3.



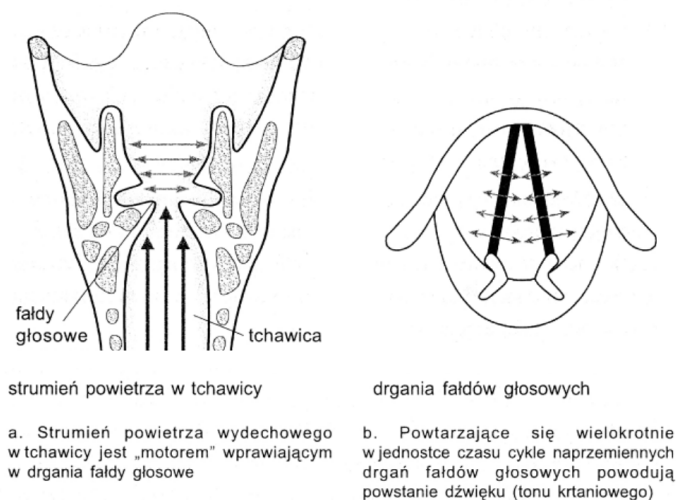
Rys. 3.3. Przekrój pionowy krtani [40]

Elementy kanału głosowego znajdujące się nad głośnią pełnią rolę rezonatorów głosowych. Te części kanału można podzielić w następujący sposób

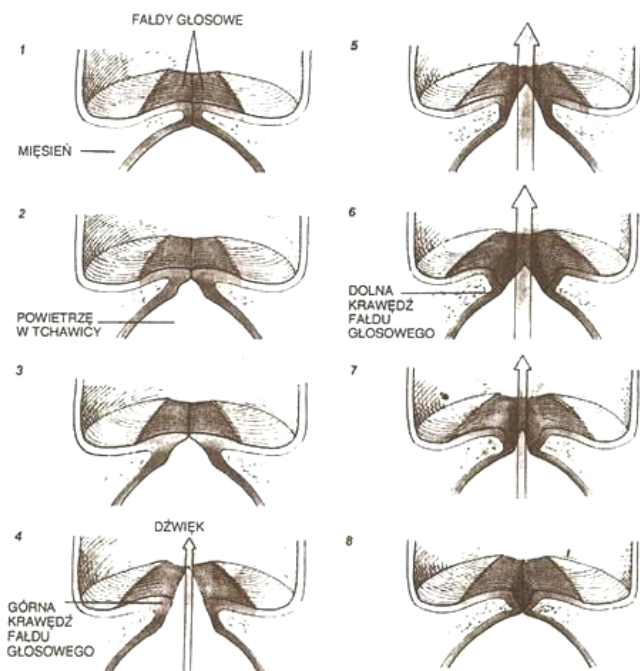
- dolne – położone poniżej głośni; do nich należą: tchawica, oskrzela, płuca – są one określane wspólnie, jako *rezonator piersiowy*
- górne – położone powyżej głośni; do nich należą: zatoki przynosowe, jama nosowa, gardło, jama ustna – te z kolei są określane wspólną nazwą, jako rezonator „nasady”; nazywa się je także rezonatorami ruchowymi ze względu na ich zdolność do zmiany objętości i kształtu – te zmiany mają wpływ na modulację głosu.

Zespołem rezonatorów jest nasada, która wzmacnia sygnał w pewnych wybranych częstotliwościach. W tym zespole są generowane dźwięki o charakterze szumowym. Kształt i wielkość jamy gardłowej może być w częściowo modyfikowana przez ruchy języka. W kanale głosowym o niezmiennych parametrach rezonatora jest jama nosowa, która bierze udział w formowaniu grupy dźwięków takich jak *m, n, ń, q, ę*. Najbardziej znaczącym rezonatorem jest jama ustna, której kształt oraz wielkość zależą od ruchów języka, dolnej szczęki, ust, policzków i podniebienia miękkiego.

Mowa jako sygnał akustyczny należy do klasy zjawisk fizycznych, które subiektywnie postrzegamy jako proste i oczywiste, bo są stałym składnikiem codziennego doświadczenia, a których rzeczywista złożoność przekracza wszelkie wyobrażenie. Mając doskonale rozwinięty narząd percepcji mowy w postaci ludzkiego ucha i mózgu, a także niezwykle sprawne systemy generacji mowy subiektywnie elementy komunikacji głosowej oceniamy jako bardzo proste a wręcz banalne. Tymczasem w rzeczywistości system artykulacyjny (jako źródło sygnału akustycznego), a szczególnie jego elementy, takie jak struny głosowe, język, wargi, które wykonują bardzo wiele precyzyjnych ruchów.



Rys. 3.4. Schemat tworzenia drgań powietrza w głośni [28]



Rys. 3.5. Ułożenie strun głosowych podczas generacji dźwięku. Początkowo (1) fałdy stykają się, ale wypływający tchawicą strumień powietrza rozdziela je (2-7). Cykl kończy się ponownym zetknięciem fałdów głosowych [28].

Z fizycznego punktu widzenia, warunkiem do powstania dźwięku jest wytworzenie drgań powietrza przechodzącego przez szparę głośni, które powstają w krtani na skutek poprzecznych ruchów fałdów głosowych do ich długiej osi. Mechanizm powstawania tych drgań w sposób graficzny przedstawiono na rysunku 3.4.

Rozwarcie szpary głośni następuje po przekroczeniu pewnej krytycznej wartości ciśnienia podgłośniowego. Rozpoczyna się wówczas stopniowy proces rozdzielania fałdów (od dołu ku górze) zakończony całkowitym otwarciem głośni. Powtarzające się wielokrotnie w jednostce czasu quasi-periodyczne cykle rozwierania i zwierania fałdów głosowych powodują powstawanie drgań powietrza, czyli dźwięku. Właściwości tego dźwięku, który nazywamy tonem krtaniowym lub tonem podstawowym, zależy od właściwości fałdów głosowych - ich długości, napięcia, elastyczności i masy, oraz charakteru przepływu powietrza. Częstotliwość tonu podstawowego F_0 można określić poniższym wzorem (3.1).

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{m}} \quad (3.1)$$

gdzie: m to masa drgających strun głosowych podawana w [kg], s to współczynnik sprężystości strun głosowych wyrażany jednostką [N/mm].

Parametry tonu podstawowego mogą być modulowane poprzez czynność mięśni kraniowych, a w szczególności przez mięsień głosowy. Taka właściwość umożliwia zmiany intonacji i modulację głosu, nadając mu charakterystyczne dla danej osoby brzmienie. Schematyczne położenie więzadeł głosowych i chrząstek nalewkowatych podczas różnych czynności oddechowo – artykulacyjnych przedstawiono na rysunku 3.5. Taka właściwość umożliwia zmiany intonacji i modulację głosu, nadając mu charakterystyczne dla danej osoby brzmienie.

3.3. Materiał badawczy i metodyka badań

Przedstawione w tym rozdziale monografii tezy, oparte są na konkretnych badaniach empirycznych, które prowadzono w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki w okresie kilkunastu lat w kilku różnych obszarach problemowych. Obszary te są rozłączne z punktu widzenia medycyny, ale sprowadzają się do takiego wspólnego elementu w którym za każdym razem źródłem informacji i podstawą podejmowanych decyzji są analizy oparte na badaniu sygnału mowy zdeformowanej patologicznie. Przedstawione badania wykonano w oparciu o próbki mowy zdeformowanej patologicznej oraz w oparciu o próbki mowy prawidłowej, stanowiące każdorazowo oddzielnie dopasowany zbiór kontrolny we wszystkich problemach szczegółowych, a dotyczących zagadnień analizy mowy zdeformowanej patologicznie. Wybór fraz i zestawów wyrazów wypowiedzianych przez badane osoby, dokonywana była w oparciu o analizę morfologiczną i czynnościową oczekiwanych dysfunkcji narządów mowy, przy rozważanej deformacji sygnału mowy co powodowało, że w badaniach dysponowano materiałem zawierającym grupy wyrazów tak dobranych pod względem ich cech fonetycznych, by wnosiły maksimum informacji o przyczynach powstawania zniekształceń mowy. Słowa testu dobierano tak, aby były zrozumiałe, łatwe do powtórzenia. Najczęściej składały się z jednej lub dwóch sylab. Zarówno pacjenci jak i osoby grupy wzorcowej czytali ten sam tekst. Co więcej, rozwiązanie stawianych zadań wymagało każdorazowo zgromadzenia odpowiedniej liczby próbek tych sygnałów związanych z różnymi formami rozważanych patologii. Rejestrację tekstu zarówno mowy zniekształconej jak i prawidłowej, wykonywano w warunkach komory bezdechowej. W ten sposób uzyskano odpowiednio opisaną bazę danych w postaci plików zapisanych w formacie *wav*, która była podstawą do dalszych analiz.

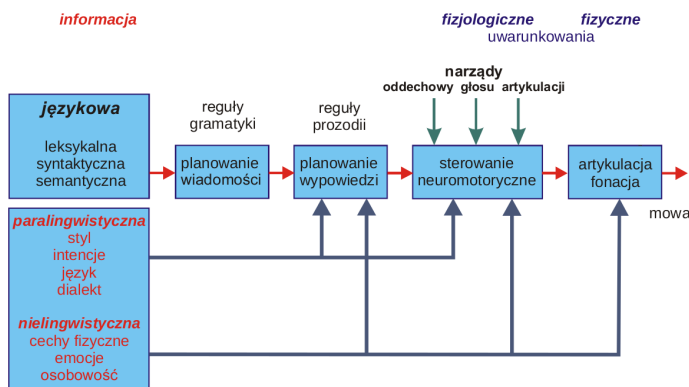
Z punktu widzenia tematyki tej monografii interesujące jest wykorzystanie akustycznego sygnału mowy, jako nośnika informacji w systemach diagnostyki i terapii medycznej.

Głos człowieka, jako bardzo złożone zjawisko, wymaga dla przeprowadzenia jego oceny wieloparametrowej charakterystyki. Złożoność tego zjawiska naszkicowano na rysunku 3.6.

Sygnal akustyczny mowy, a później ekstrahowane z niego parametry, są źródłem informacji o budowie (anatomia) i prawidłowości pracy (fizjologia) oraz o anomaliach i schorzeniach wewnętrznych organów człowieka (patologia). Niebanalną kwestią staje się w tej sytuacji opracowanie metodyki takich badań, które pozwolą wykryć fakt uszkodzeń chirurgicznych i innych (np. pointubacyjnych) elementów krtani, zwłaszcza strun głosowych, zmian pooperacyjnych i protetycznych w rejonie ust, a także osób z wrodzonymi wadami wymowy.

Mając powyższe na uwadze, stosowana metodyka badania głosu w której niebagatelną sprawą jest przedstawienie wyników badań (szczególna przydatność w diagnostyce i terapii medycznej), powinna sprostać następującym celom [36]:

- umożliwić diagnostykę etiologiczną schorzenia,
- określić stopień i rozległość zmian w narządzie głosu,
- ocenić jakość tworzonego głosu,
- pozwolić na ustalenie rokowania,
- umożliwić monitorowanie stwierdzonych odchyłeń w czynności narządu głosu w sensie regresji, progresji lub stabilizacji stwierdzonych zmian.



Rys. 3.6. Źródła zmienności głosu i mowy [39]

W praktyce klinicznej stosowane są powszechnie dwie grupy tradycyjnych metod diagnostyki oceny stanu narządu mowy oraz postępów w jego leczeniu i terapii logopedycznej. Pierwsza polega na subiektywnej ocenie słuchowej głosu pacjenta, druga natomiast obejmuje metody, w których wykorzystuje się sprzęt umożliwiający obserwację poszczególnych części narządu artykulacyjnego.

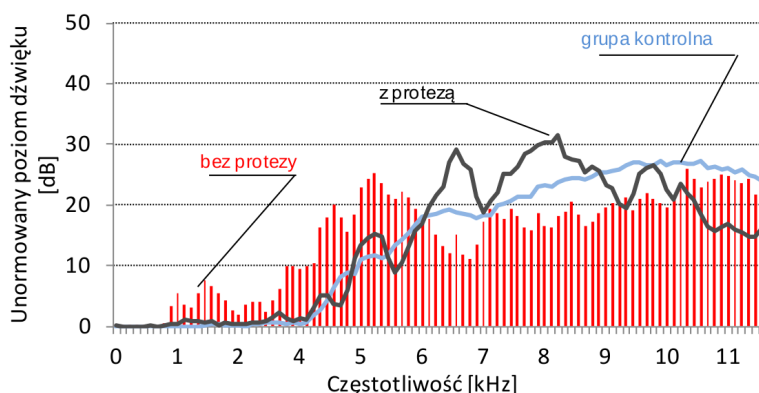
W niniejszej monografii skupiono uwagę na metodach akustycznych, które należą do metod nieinwazyjnych i zobiektywizowanych. Oparte, najogólniej mówiąc, na analizie wartości informacyjnej sygnału mowy, jako naturalnego i ostatecznego produktu działania narządu głosu. Intensywny rozwój profesjonalnych sposobów przetwarzania i analizy sygnałów spowodował, że zastosowanie metod akustycznych do oceny głosów patologicznych jest nadal rozwijane i obecnie stanowią one integralną część poszerzonych i kompleksowych badań narządu głosu. W prowadzonych badaniach realizowanych od wielu lat, głównie skupiono uwagę na następujących grupach badawczych (przyczynach powstawania patologii mowy):

- obszar protetyki stomatologicznej,
- obszar chirurgii szczękowo-twarzowej,
- rozszczepy podniebienia dzieci,
- obszar laryngologicznych schorzeń i deformacji (intubacja) krtani,
- obszar wrodzonych lub nabytych wad wymowy

Nazewnictwo wymienionych grup zostało nadane przez autorów (w czasie gromadzenia materiału badawczego) pracy. Nazwy te pochodzą od ogólnych problemów chorobowych osób objętych badaniami, których skrótowe opisy przedstawiono w kolejnych podrozdziałach w dalszej części monografii.

3.3.1. Obszar protetyki stomatologicznej

Jest oczywiste, że każda zmiana w układzie zębowym wpływa destrukcyjnie na wymowę. Wyraźne nieprawidłowości, dotyczące głosek przedniojęzykowych, głównie spółgłosek zębowych (np. *t*, *d*, *s*, *z*), występują przy bezzębiu.



Rys. 3.7. Przykładowe uśrednione zbiorcze widma fonemu „s” - wzorec, z protezą i bez protezy

Zaburzeń tych nie można wyrównać bez udziału protez. Protezowanie bezzębia jest zagadnieniem trudnym, zarówno w aspekcie podstawowej funkcji użębienia (żucie pokarmu, ale także aspekty estetyczne), jak i w zakresie efektów ubocznych, jakimi są niewątpliwie wywołane przez protezę dysfunkcje mowy i zaburzenia fonetyki. Konkretnie w jednej z serii badań poszukiwano najkorzystniejszego dla wymowy głoski „s” ustawienia siekaczy dolnych w protezach całkowitych. Wyniki tej serii badań zostały oddzielnie publikowane w *Archives of Acoustics* [35].

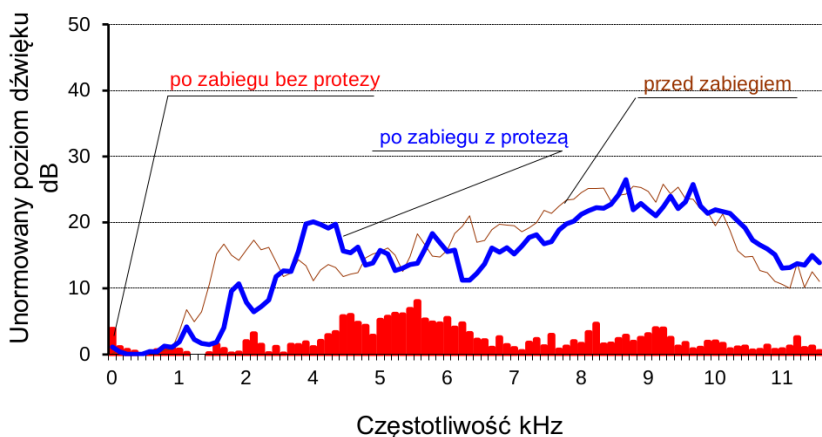
Zadanie, jakie stało przed systemem oceny stopnia patologii mowy polegało więc w tym przypadku na wspomaganiu doboru najkorzystniejszego kształtu protezy na podstawie oceny stopnia deformacji sygnału mowy. Przykładowe przebiegi fonemów uzyskane dla stosowanych w trakcie tych badań próbek mowy prawidłowej i patologicznej (z naniesionymi przedziałami ufności), dla różnych kształtów badanej protezy pokazano na rysunku 3.7.

Na wyrazistość wymowy głosek przedniojęzykowych w protezach całkowitych mają wpływ następujące czynniki: wysokość zwarcia, ustawienie zębów przednich górnych i dolnych, grubość płyty podniebiennej, wymodelowanie na niej brodawki przysiecznej i fałdów podniebiennych oraz stabilizacja protez [37].

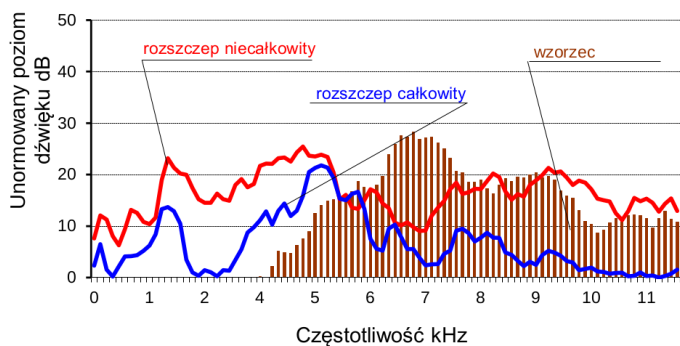
3.3.2. Obszar chirurgii szczękowo-twarzowej

Ubytki pooperacyjne podniebienia, szczęk oraz ubytki porozszerzopowe podniebienia, powodują ciężkie kalectwo estetyczne i czynnościowe chorego. Poprawę wyglądu i znaczne zmniejszenie upośledzenia czynności mowy, żucia, połykania i oddychania uzyskuje się drogą chirurgicznych rekonstrukcji oraz rehabilitacji protetycznej. Jednak nawet wykorzystanie wielu chirurgicznych zabiegów i użycie najdoskonalszych protetycznych metod rekonstrukcyjnych nie zawsze pozwala na całkowite odbudowanie utraconych struktur anatomicznych twarzy i jamy ustnej. Przejawia się to faktem, że mowa pacjenta po zabiegach chirurgicznych i po protezowaniu odbiega znacznie od wzorca mowy prawidłowej. Oceny stopnia deformacji mowy (a dokładniej – oceny stopnia ograniczenia występującej po operacji deformacji mowy) stanowią także ważny element przy doborze i optymalizacji protezy. Przykładowe zdeformowane przebiegi fonemów z naniesionymi przedziałami ufności, dla wypowiedzi przed zabiegiem, po zabiegu bez protezy i po zabiegu z protezą przedstawiono na rysunku 3.8.

Na rysunku 3.9 przykładowo przedstawiono uśrednione widma głoski „s” odpowiednio dla mowy wzorcowej, wymawianej przez grupę kontrolną, jak i dla mowy patologicznej, czyli grupy dzieci operowanych z powodu rozszczepu podniebienia całkowitego i niecałkowitego.



Rys. 3.8. Uśrednione widma fonemu „s”, przed zabiegiem, po zabiegu z protezą i po zabiegu bez protezy

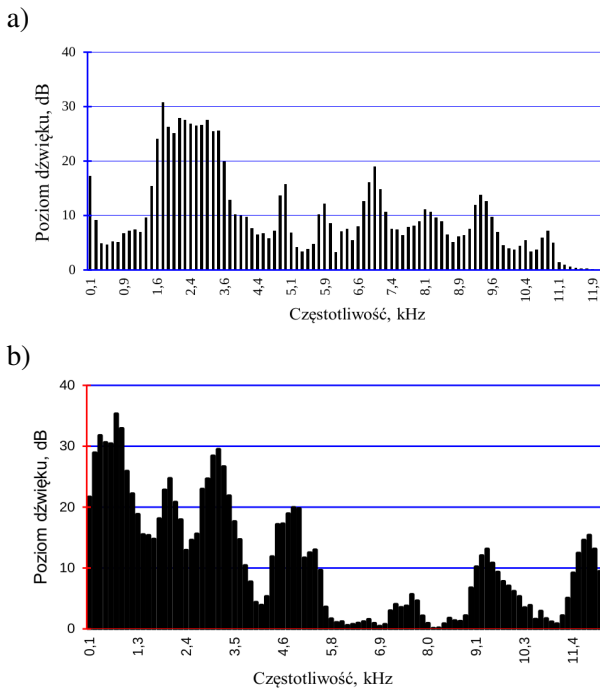


Rys. 3.9. Uśrednione widma fonemu „s”, wzorzec, rozszczip całkowity i rozszczip niecałkowity

3.3.3. Obszar laryngologicznych schorzeń i deformacji (intubacja) krtani

Statystyki medyczne podają, iż blisko połowa osób cierpiąca na zaburzenia głosu posiada łagodne zmiany przerostowe na fałdach głosowych. Do tego obszaru zagadnień zaliczono także uszkodzenia fałdów głosowych, jako następstwo intubacji. Nie jest to problemem medycznym o dużym znaczeniu. Częstość powstawania takich uszkodzeń jest na szczęście niewielka, a ich skala na ogół jest ograniczona. Skoro jednak się niekiedy pojawia, to powinien zostać dokładnie zbadany.

Niebanalną kwestią staje się w tej sytuacji opracowanie metodyki takich badań, które pozwolą wykryć fakt uszkodzenia elementów krtani, pozwolą ocenić stopień powstałego uszkodzenia, umożliwią śledzenie procesu rehabilitacji w przypadkach uszkodzeń pooperacyjnych i ewentualne kontrolowanie tego procesu i wreszcie dadzą podstawę do obiektywnej oceny czynników związanych z powstawaniem pooperacyjnych uszkodzeń krtani.

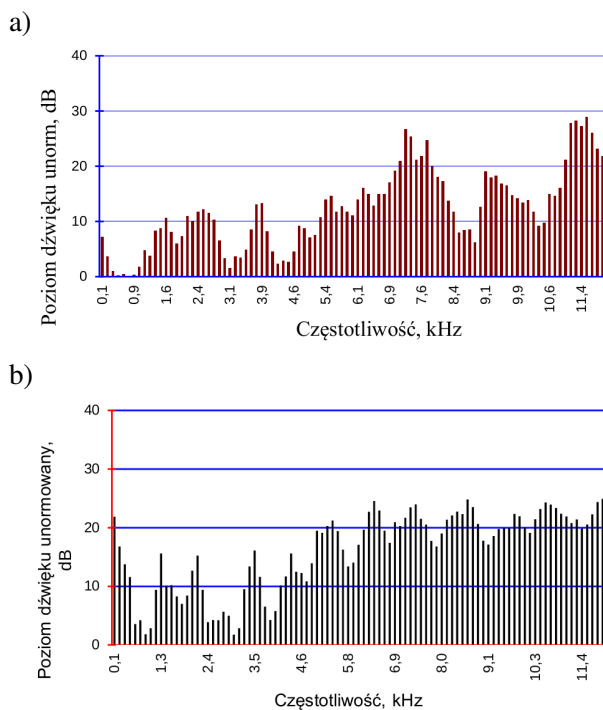


Rys. 3.10. Widmo mowy poprawnej a) dźwięk „i”, b) dźwięk „a”

Złożoność problemu ilustrują widma sygnałów mowy poprawnej i zdeformowanej zabiegiem chirurgicznym. Takie przykładowe uśrednione widma samogłosek „i” oraz „a” mowy poprawnej pokazano odpowiednio na rysunkach 3.10a i 3.10b.

Natomiast na rysunkach 3.11a i 3.11b pokazano widma mowy zdeformowanej zabiegiem chirurgicznym (chordektomia) w rejonie krtani.

Widać jak znaczne zmiany wprowadza zabieg chirurgiczny stanowiący znaczną ingerencję w rejonie fałdów głosowych.



Rys. 3.11. Widmo mowy po zabiegu chordektomii a) dźwięk „i”, b) dźwięk „a”

3.4. Parametryzacja sygnału mowy

Procesy akustyczne opisywane są z reguły kłopotliwymi w analizie sygnałami będącymi funkcjami czasu. Cechą charakterystyczną tych sygnałów jest również ich redundancja. Obie te przesłanki prowadzą do wniosku, iż konieczne jest opracowanie metod pozwalających zarówno na opis danych procesów w dziedzinie innej niż dziedzina czasu jak i na redukcję wymiarowości przestrzeni opisującej te sygnały. Podczas badań szczególny nacisk położono na analizę i opis struktury przestrzeni cech opisujących patologiczny sygnał mowy. Dokładna znajomość topologii przestrzeni cech (niełatwej do bezpośredniej oceny ze względu na jej wielowymiarowy charak-

ter) pozwala później na efektywne zastosowanie właściwych metod klasyfikacji czy automatycznego rozpoznawania.

Decydujące parametry sygnału akustycznego mowy związane są przede wszystkim z generatorem sygnału mowy. Są to: przebieg tonu krztaniowego, iloczasy występujące, rozkłady akcentów, cechy segmentalne czyli te elementy, które są niezależne od wypowiedzianej treści, natomiast odzwierciedlają cechy anatomiczne i temperament osoby mówiącej. Do parametrów, które potwierdziły swoją użyteczność w tradycyjnych metodach analizy i rozpoznawania mowy najczęściej możemy zaliczyć: parametry częstotliwościowe (wyniki multispectrum), częstotliwości formantowe, momenty widmowe, współczynniki mel-cepstralne.

Poniżej zostaną pokrótce przedstawione wymienione wyżej parametry.

Parametry częstotliwościowe czyli wyniki multispectrum

$$G(f, t) = \int_{-\infty}^{\infty} p(\tau)w(\tau - t)e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (3.2)$$

Częstotliwości formantowe

$$F_i(j) \equiv f_i \Leftrightarrow \left(\left. \frac{\partial G(t_j, f_i)}{\partial f} \right|_{f_i} = 0 \right) \wedge \left(\left. \frac{\partial^2 G(t_j, f_i)}{\partial f^2} \right|_{f_i} < 0 \right) \wedge \bigwedge_{j=1}^{i=1} \left\{ \left[\exists f_j < f_{j+1} : \left(\left. \frac{\partial G(t_j, f_i)}{\partial f} \right|_{f_i} = 0 \right) \wedge \left(\left. \frac{\partial^2 G(t_j, f_i)}{\partial f^2} \right|_{f_i} < 0 \right) \right] \wedge (F_{id} \leq f_i \leq F_{ig}) \right\} \quad (3.3)$$

gdzie: F_{id} i F_{ig} są wartościami ograniczającymi szukane pasmo częstotliwości formantów od dołu i od góry, t_j to j -ty przedział czasu, dla którego obliczane jest widmo krótkoterminowe, f_i częstotliwość środkowa i -tego pasma

Momenty widmowe

$$M_m(j) = \sum_{i=f_d}^{i=f_g} |G(t_j, f_i)| [f_i]^m \quad (3.4)$$

gdzie: $G(t_j, f_i)$ to widmo dynamiczne (czasowo-częstotliwościowe), f_i to częstotliwość środkowa i -tego pasma, t_j jest j -tym odcinkiem czasu, dla którego liczone jest widmo chwilowe, f_d , f_g są odpowiednio dolną i górną częstotliwością pasma, dla którego wyznaczany jest moment widmowy.

Współczynniki mel-cepstralne

$$C_n = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{i=1}^N \log(s_i) \cos\left(\frac{\pi n}{N} \left(i - \frac{1}{2}\right)\right) \quad (3.5)$$

gdzie: C_n jest n -tym parametrem cepstralnym, s_i jest i -tym parametrem otrzymanym przez całkowanie widma filtrowanego przez i -ty filtr w zbiorze, a N jest liczbą filtrów (skala melowa).

Te wymienione prowadzone przez wielu autorów kierunki badań niewiele wnoszą, jeżeli chodzi o patologie mowy i rozpoznawanie rodzaju jej zaburzenia.

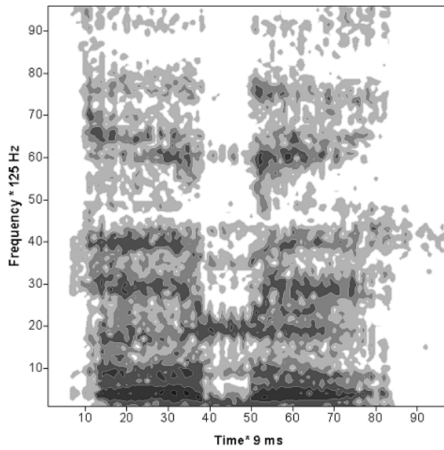
Na rysunku 3.12, przedstawiono wynik wstępnego przetwarzania zarejestrowanego sygnału akustycznego mowy $p(t)$, jakim jest widmo dynamiczne $G(t_j, f_i)$, które jest zdyskretyzowane w czasie, częstotliwości i amplitudzie. W praktyce foniatrycznej lub laryngologicznej taka forma prezentacji sygnału akustycznego mowy jest często stosowana w celu oceny jakości głosu, a także, traktowana przez większość badaczy jako metoda wstępnego przetwarzania sygnału. Dostarcza także wiele informacji niezbędnych w procesie dalszej analizy sygnału. Natomiast czynnikami ważnymi w opisie mowy patologicznej są czynniki zakłócające naturalny proces artykulacji. Mogą to być czynniki zniekształcające funkcje generatora krtańowego odpowiedzialne bądź to za choroby, bądź to za zabiegi operacyjne wykonywane w obrębie kanału głosowego. Wydobycie tych czynników z sygnału akustycznego wymaga szeregu przekształceń dokonanych na zarejestrowanym „surowym” sygnale akustycznym. Jednym ze spostrzeżeń, jakie można zrobić obserwując skutki patologii w dziedzinie artykulacji sygnału mowy, jest stwierdzenie, że w sygnale patologicznym znacząco inaczej (w stosunku do wzorca mowy prawidłowej) rozkłada się energia wewnątrz poszczególnych pasm widmowych sygnału. Ta własność jest uwypuklana przez zaproponowane przez autorów współczynników mocy względnej W_i , jako nowych współrzędnych wektora cech.

Współczynniki mocy względnej można zdefiniować następująco (3.6):

$$W_k = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=p}^{i=K} G(t_j, f_i)}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=f_d}^{i=f_g} G(t_j, f_i)} \quad (3.6)$$

gdzie: $G(t_j, f_i)$ to widmo dynamiczne (czasowo-częstotliwościowe), f_i to częstotliwość środkowa i -tego pasma, t_j j -ty odcinek czasu, dla którego liczone jest widmo chwilowe, p , K oznaczają początek i koniec wybranego pasma częstotliwości, zaś f_d i f_g określają odpowiednio dolną i górną częstotliwość wybranego pasma.

Dobór granic wydzielanych pasm stanowi jeden z głównych problemów badawczych. Ilość i szerokość pasm dla których liczymy te współczynniki, określane są w zależności od rozpatrywanych patologii kanału głosowego.



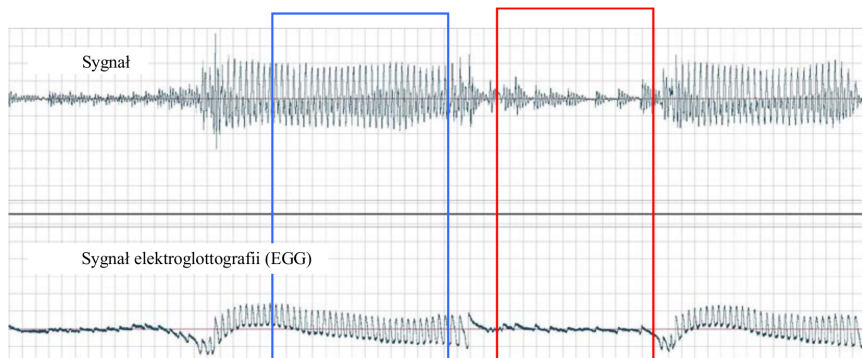
Rys. 3.12. Widmo słowa „ala”

3.5. Analiza wyników, podsumowanie

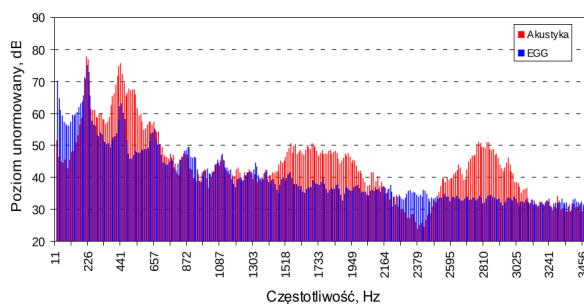
Ubytki pooperacyjne podniebienia i szczęk powodują ciężkie kalectwo estetyczne i czynnościowe chorego, a także upośledzenie czynności mowy. Mowa pacjenta po zabiegach chirurgicznych i po protezowaniu znacznie odbiega od wzorca mowy prawidłowej. Oceny stopnia deformacji mowy (a dokładniej – oceny stopnia ograniczenia występującej po operacji deformacji mowy) stanowią także ważny element przy doborze i optymalizacji protezy. Współcześnie coraz częściej w praktyce laryngologicznej i foniatrycznej spotyka się organiczne schorzenia krtani, które są przyczyną zaburzeń głosu. Dla celów profilaktyki, diagnostyki oraz terapii narządu głosu – krtani za pomocne można uznać stworzenie i wprowadzenie do praktyki laryngologiczno-foniatrycznej obiektywnych akustycznych metod wspomagających wielopłaszczyznową ocenę lekarską stanu zdrowia pacjentów. Autorzy zaproponowali nowe oryginalne parametry sygnału akustycznego mowy (nazwane w pracy współczynnikami mocy względnej), które użyte jako współrzędne wektora cech wnoszą dodatkowe informacje dotyczące zmian parametrów kanału głosowego (jako źródła dźwięku), objawiających się w postaci deformacji sygnału mowy (mowa patologiczna). Pomimo uzyskanych dodatkowych informacji niesionych przez zaproponowane oryginalne parametry sygnału akustycznego, okazało się, że niezwykle trudno jest diagnozować stan i patologiczne zmiany traktu głosowego na podstawie samej tylko analizy tego sygnału. Prezentowana metodyka oceny stopnia deformacji mowy może być bezpośrednio stosowana w monitorowaniu badań pacjentów po operacji krtani, a także operacji nosa i zatok oraz intubacji w znieczuleniu ogólnym.

W analizie wyników badań w tej pracy poświęcono także wrodzonym lub naby-

tym wad wymowy. Te wady objawiają się głównie nie płynnością mówienia. Podczas artykulacji najczęściej występuje powtarzanie głosek, sylab, wyrazów a nawet fraz. W tym procesie powtórzeń występują przeciągania dźwięków. Dochodzi także do chwilowego blokowania a nawet pauzowania. W celu głębszego poznania mechanizmów wykonano równoczesną rejestrację sygnału akustycznego mowy i sygnału EGG. Badanie EGG – elektrogłottografia – polega na pomiarze impedancji zwierania i rozwierania strun głosowych.

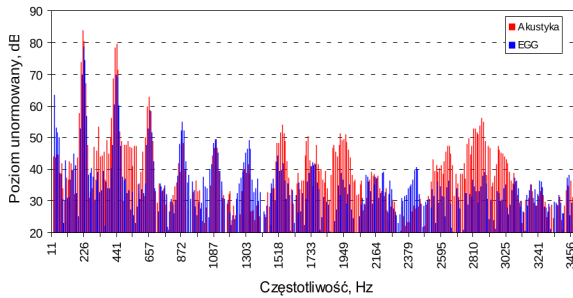


Rys. 3.13. Przebiegi czasowe, sygnał mowy – rysunek górny, sygnał EGG – rysunek dolny



Rys. 3.14. Widmo sygnałów (mowy i EGG) – ramka czerwona

Na rysunku 3.13 przedstawiono przebiegi czasowe sygnału akustycznego i sygnału EGG towarzyszące nie płynności mówienia. Ramkami niebieską i czerwoną zaznaczono fragmenty związane z przeciąganiem i blokowaniem. Idea metodyki której wyniki badań pozwoliłyby odpowiedzieć na te pytania polega na tym, że sygnały (akustyczny i EGG) są rejestrowane jednocześnie. Tak uzyskane dane dają już możliwość dokładniejszej analizy problemu jakim jest nie płynność mówienia. Już z tak przedstawionych wyników można wnioskować, że występują w tym procesie mowy



Rys. 3.15. Widmo sygnałów (mowy i EGG) – ramka niebieska

nieregularnej pewne zaburzenia. Struny głosowe nie wykonują regularnych drgań, co widać na sygnale EGG czyli na dolnym wykresie na rysunku 3.13.

Porównując odpowiednio widma na rysunkach 3.14 i 3.15 można skorelować powstanie sygnału dźwiękowego czyli sygnału mowy z sygnałem drgań strun głosowych. Dokładną analizę procesu blokowania powstawania dźwięku u osób z tą wadą wymowy, należy poszukiwać w ocenie parametrów drgań strun głosowych i skorelowanych z nimi parametrów akustycznych dźwięków mowy.

Dźwięk może być wykorzystywany nie tylko w diagnostyce ale też w leczeniu. Następny rozdział omawia badania nad treningiem drganiami ogólnymi na człowieka.

Rozdział 4

Wpływ treningu drganiami ogólnymi na organizm człowieka

4.1. Wprowadzenie

Nie ulega wątpliwości silny wpływ bodźców akustycznych na ludzi. Niniejszy rozdział omawia jego pozytywny, a wręcz leczniczy wpływ.

Badania medyczne dotyczące terapii wibracyjnej sięgają XVII wieku. Dr Arnold Snow, w swojej książce *Mechanical Vibration* [43] z 1912 roku podkreślił, że terapia wibracyjna była stosowana już w czasach starożytnych. Kolejne badania o stymulującym wpływie wibracji na organizm człowieka zostały przeprowadzone w latach 70 przez rosyjskiego naukowca doktora Nazarova. Dzięki jego odkryciom trening wibracyjny stał się nie tylko stałym elementem przygotowań radzieckich olimpijczyków do zawodów, ale również podstawą treningu radzieckich kosmonautów.

Trening wibracyjny jest obecnie popularną formą treningu sportowego, fitnessu i rehabilitacji [44], spowodowało to powstanie wielu nowych rodzajów platform wibracyjnych, ale brak jest systematycznych badań wpływu krótkotrwałej ekspozycji organizmu człowieka na drgania o niskiej częstotliwości, brak też jest doniesień o wpływie drgań na wyższe czynności nerwowe człowieka. Do tej pory nie prowadzono analiz korelacyjnych pomiędzy zmianami podstawowych parametrów funkcjonalnych (fizjologicznych i psychologicznych) pod wpływem ekspozycji drgań niskiej częstotliwości.

Istnieją przesłanki, by przypuszczać, że drgania całego ciała (ang. *Whole Body Vibration*) są ekwiwalentem wysiłku fizycznego pozbawionym niedogodności związanych z przeciążeniem narządu ruchu. Co z punktu widzenia trybu życia współczesnego człowieka cierpiącego na chroniczny niedobór ruchu jest (powinno być) interesujące. Rytmiczny skurcz i rozkurcz mięśni szkieletowych wymuszony przez urządzenie aplikujące drgania wywołuje reakcję całego ciała i powoduje uruchomienie korzystnych mechanizmów w organizmie człowieka. Wielu badaczy pisze o pobudzającym wpływie wibracji na układ krążenia: naczynia krwionośne rozszerzają się, zwiększa się krążenie krwi, mięśnie zostają lepiej zaopatrzone w tlen i inne składniki odżywcze [45–47]. Drgania mogą poprawiać przepływ krwi, ciśnienie parcjalne tlenu, wysycenie hemoglobiny tlenem i wykorzystanie tlenu przez tkanki [48, 49].

Przystępując do tych badań, autorzy oczekiwali, że zmiany wytypowanych parametrów będą większe w warunkach ekspozycji bodźca, niż w sytuacji jego braku. Uzasadnione jest to założeniem, iż drgania będą stanowiły trening fizyczny dla organizmu człowieka [50]. Ekspozycja drgań powinna wymuszać amortyzację przez układ mięśniowy i kostny, powodować pracę mięśni i działanie zmiennych sił na układ kostno-stawowy i mięśniowy człowieka. W konsekwencji mogą aktywizować zmysł równowagi ciała [51] i systemowe krążenie krwi [52], dzięki temu mogą niwelować negatywne skutki pozycji siedzącej [53]. Można przypuszczać, że ekspozycja organizmu na drgania może powodować zmiany poziomu aktywacji psychicznej badanych [54].

4.2. Metodyka badań

Do wywołania cyklicznych zmian obciążeń kości zaproponowano zastosowanie drgań harmonicznym o częstotliwości biegu człowieka (około 210 kroków na minutę), jako najbardziej właściwej z fizjologicznego punktu widzenia. Założono, że drgania powinny być bezpieczne i nieuciążliwe. Zespół realizujący projekt badawczy posiada na przeprowadzone badania zgodę Komisji Bioetyki Akademii Medycznej w Łodzi.

Stosowany bodziec był bezpieczny, zgodny z wytycznymi dotyczącymi bezpieczeństwa testów i doświadczeń z udziałem ludzi PN-EN ISO 13090-1: 2002, eksponowanych na ogólne drgania mechaniczne i powtarzalne wstrząsy, które opisano w normie ISO 2631-1:1997.

W Laboratorium AGH w Krakowie zostały wykonane dwa stanowiska doświadczalne, umożliwiające wzbudzanie drgań ogólnych pionowych o przyspieszeniu równym $1,74 \text{ m/s}^2$, amplitudzie 4 mm i częstotliwości ok. 3,2 Hz. Osoby badane podczas treningu na platformach wibracyjnych przedstawiono na rysunku 4.1.

Rekrutacja do eksperymentu polegała na wyborze osób (płci żeńskiej), które przysłały wcześniej potwierdzenie o przyjeździe do sanatorium, lub odpowiedziały na ogłoszenie o naborze w dniu przyjazdu. Uczestnicy zostali zapoznani z zasadami eksperymentu i wyrazili dobrowolną zgodę na uczestnictwo w badaniach. W tabeli 4.1 przedstawiono charakterystyki badanych grup.

Badanie przeprowadzono dwuetapowo: grupa eksponowana drganiami oraz grupa kontrolna w Krynicy – Zdroju. Grupa eksponowana (29 osób) uczestniczyła w dwiętnastu dwudziestominutowych treningach drganiami ogólnymi niskiej częstotliwości (pozycja stojąca) o stałej porze dnia dla każdej osoby. Bodziec aplikowany był na całe ciało w pozycji stojącej, przez nogi – drgania ogólne. W czasie każdej sesji uczestniczki nosiły ten sam strój treningowy i wstępowały na platformę boso – celem uniknięcia tłumienia drgań przez obuwie.



Rys. 4.1. Osoby badane podczas ćwiczeń na platformach wibracyjnych (z lewej) i platforma wibracyjna (z prawej)

Tabela 4.1
Charakterystyki badanych grup

Krynica – lipiec						
Cecha	Zakres		Średnia	Mediana	STD**	
	min	max				
Wiek [lata]	42,00	61,00	52,76	54,00	5,16	
Wzrost [m]	1,53	1,78	1,63	1,62	0,07	
Masa [kg]	49,00	92,00	67,55	65,70	11,10	
BMI*	20,13	36,39	25,62	24,80	3,57	
Krynica – listopad						
Cecha	n	Zakres		Średnia	Mediana	STD**
		min	max			
Wiek [lata]	33	32,00	61,00	52,70	54,00	6,60
Wzrost [m]	33	1,50	1,78	1,62	1,63	0,05
Masa [kg]	33	51,00	96,00	67,00	65,06	10,06
BMI*	33	18,82	44,29	26,10	25,64	5,11
* wskaźnik masy ciała (ang. <i>body mass index</i>),						
** odchylenie standardowe (ang. <i>standard deviation</i>)						

Przed i po ekspozycji drganiami wykonywano pomiary wytypowanych parametrów (rys. 4.2). Grupa kontrolna (33 osoby) uczestniczyła w również w dziewiętna-

stu codziennych dwudziestominutowych spotkaniach, w czasie których wykonywano pomiary i nie stosowano drgań. Na rysunku 4.2 pokazano osoby badane podczas wykonywania pomiarów.



Rys. 4.2. Osoby badane podczas dokonywania pomiarów

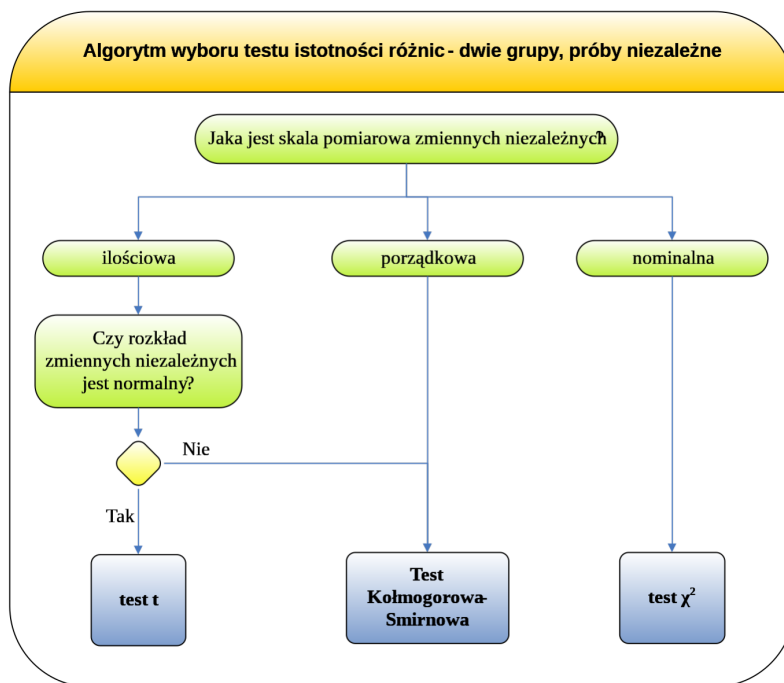
Badania wpływu drgań ogólnych (WBV) na organizm człowieka obejmowały następujące parametry funkcjonalne:

- stabilność postawy (posturografia);
- zmiany rozkładu temperatur na ciele (termografia);
- mechanikę pracy serca (EKG);
- parametry fizjologiczne (ciśnienie tętnicze oraz tętno, temperatura głęboka, masa ciała oraz zawartość tkanki tłuszczowej);
- poziom aktywacji (Test Thayera).

Następnie uzyskane wyniki poddano analizom numerycznym i statystycznym. Analiza poszczególnych grup danych otrzymanych w eksperymencie rozpoczynała

się od postawienia hipotezy, która podlegała późniejszej weryfikacji według określonego schematu wnioskowania statystycznego.

Po sformułowaniu hipotez wybierany był test istotności. Algorytm określający wybór typu zastosowanego testu w konkretnych przypadkach przedstawiono na rysunku 4.3. Kolejne dwa etapy analizy, obliczanie wartości testu sprawdzającego na podstawie wyników próby oraz znajdowanie wartości krytycznej z tablic przy ustalonym poziomie istotności. W opisywanych badaniach biomedycznych zakładano poziom istotności $p = 0,05$, wykonywane były przy pomocy pakietu komputerowego STATISTICA w wersji 8.1.



Rys. 4.3. Algorytm wyboru rodzaju testu

4.3. Wyniki badań i analiz

Wyniki badań i analiz statystycznych przedstawiono w tabelach 4.2-4.6. W związku z dużą ilością badanych parametrów poniżej pokazano tylko te zmienne niezależne, których różnice poziomów okazały się istotne statystycznie ($p < 0.05$).

W tabelach z wynikami zamieszczono: wartość średnią zmian procentowych – grup eksponowanej (Gr. E) i kontrolnej (Gr. K) dla badanej zmiennej; błąd standar-

dowy oraz wartość poziomu istotności p ; grotty obrazują trend zmian, rozważanej zmiennej (wzrost lub spadek).

Tabela 4.2
Wyniki analiz statystycznych – stabilność postawy

Zmienna	Wyniki analiz statystycznych			
	Średnia	Błąd std.	Trend	$p <$
Pole_E [%]	2,171	0,322	▲	0,001
Pole_K [%]	-0,888	0,782		
Nacisk średni_E [%]	-1,490	0,211	▼	0,03
Nacisk średni_K [%]	0,302	0,701		
Pole lewej stopy_E [%]	2,450	0,522	▲	0,001
Pole lewej stopy_K [%]	-0,984	0,886		
Średnie odchylenie X_E [%]	45,485	17,124	▲	0,05
Średnie odchylenie X_K [%]	9,473	10,584		

Tabela 4.3
Wyniki analiz statystycznych – rozkład temperatur na ciele

Zmienna	Wyniki analiz statystycznych			
	Średnia	Błąd std.	Trend	$p <$
Tmax przód E [%]	-0,578	0,198	▼	0,006
Tmax przód K [%]	0,260	0,205		
Tmax tył E [%]	-0,523	0,199	▼	0,012
Tmax tył K [%]	0,187	0,182		

Tabela 4.4
Wyniki analiz statystycznych – sygnał EKG

Zmienna	Wyniki analiz statystycznych			
	Średnia	Błąd std.	Trend	$p <$
S-T_E [%]	-2,120	4,016	▼	0,05
S-T_K [%]	4,643	2,647		

Tabela 4.5
Wyniki analiz statystycznych – parametry fizjologiczne

Zmienna	Wyniki analiz statystycznych			
	Średnia	Błąd std.	Trend	$p <$
Tętno_P [1/min]	-1,066	0,415	▼	0,004
Tętno_K [1/min]	-2,735	0,348		
Masa_E [%]	-0,067	0,009	▼	0,001
Masa_K [%]	-0,023	0,008		
TT_E [%]	-2,373	0,206	▼	0,001
TT_K [%]	-1,123	0,117		

Tabela 4.6
Wyniki analiz statystycznych – poziom aktywacji

Zmienna	Wyniki analiz statystycznych			
	Średnia	Błąd std.	Trend	$p <$
Aktywacja ogólna_E [%]	5,188	1,441	▲	0,025
Aktywacja ogólna_K [%]	1,570	0,647		
Deaktywacja senność_E [%]	-3,743	1,646	▼	0,025
Deaktywacja senność_K [%]	0,353	0,755		
Deaktywacja ogólna_E [%]	4,600	1,022	▲	0,002
Deaktywacja ogólna_K [%]	0,375	0,608		

4.4. Dyskusja, wnioski oraz perspektywy

Wpływ na stabilność postawy

Stabilność to zdolność odzyskiwania stanu równowagi, utraconej w wyniku działania czynników destabilizujących. Czynnikiem destabilizującym może być własna aktywność ruchowa organizmu lub też siły zewnętrzne pojawiające się wskutek interakcji z otoczeniem [55]. Istotny statystycznie wzrost zmiennej „pole powierzchni stóp” w grupie badanej o 2,17% w porównaniu z kontrolną -0,89%, oraz spadek średniego nacisku -1,49% (0,3% wzrostu w grupie kontrolnej). Świadczy o adaptacji elementów sklepienia poprzecznego i podłużnego stopy do podłoża. Dokładniejsze przyleganie stóp do podłoża poprawia stabilność postawy stojącej poprzez zwiększenie czworoboku podparcia. Wynik badania średniego odchylenia w osi x (COP) świadczy o istotnym statystycznie zwiększeniu średniej amplitudy wychyleń w płaszczyźnie poprzecznej o 45,48% po 20 minutach ekspozycji (9,47% w grupie kontrolnej). Ale w czasie dziewiętnastu dni badań, trend jest silnie spadkowy, co świadczy o poprawie stabilności postawy.

Wpływ na zewnętrzną temperaturę kończyn dolnych

Drgania ogólne niskiej częstotliwości istotnie statystycznie zmniejszają maksymalną temperaturę kończyn dolnych rejestrowaną za pomocą kamery termowizyjnej z przodu -0,58% (0,26% w grupie kontrolnej) jak i z tyłu -0,52% (0,19% w grupie kontrolnej). Zmniejszenie temperatury maksymalnej może świadczyć o rozszerzeniu naczyń krwionośnych, wzmożeniu krążenia obwodowego z następową redystrybucją krwi na obwód (z dużych tętnic do tętniczek i naczyń włosowatych mięśni), ewentualnie o zmniejszeniu miejscowego przekrwienia o etiologii zapalnej pod wpływem drgań. Wynika z tego, że bodziec wibracyjny silnie stymuluje ukrwienie kończyn dolnych, ale w dawkach nadmiernych może prowadzić nawet do uszkodzenia naczyń krwionośnych.

Wpływ na mechanikę pracy serca (EKG)

Jednym z rozważanych możliwych efektów pozytywnego oddziaływania wibracji na organizm człowieka jest wpływ na układ sercowo – naczyniowy. Odcinek ST jest wyrazem repolaryzacji mięśnia sercowego. Jego obniżenie lub uniesienie powyżej 1 mV od linii izoelektrycznej może świadczyć o niedokrwieniu serca [56]. W opisywanym doświadczeniu stwierdzono statystycznie istotne obniżenie ST w grupie eksponowanej na drgania w porównaniu z grupa kontrolną (grupa eksperymentalna -2,12% zaś grupa kontrolna 4,64%). W liczbach bezwzględnych nie przekraczało ono 5% przyjętej cechy (1 mV), więc w sensie klinicznym nie stanowi ono zagrożenia dla

zdrowia. Może być natomiast interpretowane jako obniżenie napięcia układu współczulnego, co samo w sobie jest zjawiskiem korzystnym, gdyż prowadzi do optymalizacji pracy mięśnia sercowego [57]. Należy wnioskować, że drgania niskiej częstotliwości w przeprowadzonym eksperymencie nie miały wpływu na wybrane parametry sygnału EKG. Daje to możliwość stosowania tego typu drgań w rehabilitacji pacjentów z szeroko pojętymi problemami kardiologicznymi.

Wpływ na ciśnienie tętnicze oraz tętno

W doświadczeniu nie udało się wykazać istotnego statystycznie obniżenia tętna. W zestawieniu z grupą kontrolną obie grupy zanotowały spadek odpowiednio -1,07% w grupie eksperymentalnej oraz -2,73% w grupie kontrolnej. Jednak zauważalny jest jego spadek podczas dziewiętnastu dni eksperymentu, co jest zjawiskiem jak najbardziej pozytywnym i może świadczyć o fizycznym trenowaniu organizmu.

Wpływ na tkankę tłuszczową, masę i temperaturę ciała

W trakcie ekspozycji na wibracje dochodzi do zamiany energii kinetycznej na ciepłą poprzez uaktywnienie sił tarcia. W 1956 r. Ettinger [58] wykazał po raz pierwszy kataboliczne działanie drgań wysokiej częstotliwości na tkankę tłuszczową zwierząt. Ekspozycja na drgania ogólne niskiej częstotliwości zmniejsza ogólną ilość tkanki tłuszczowej aż o -2,37% u 96% próby w stosunku do -1.12% u 66% próby w grupie kontrolnej. Można to wytłumaczyć reakcją na mechaniczne odkształcanie, miejscowym wzrostem ciepłoty, uaktywnieniem procesów spalania tkanki tłuszczowej (katabolicznych) [59]. Potwierdza to istotne statystycznie obniżenie masy, uczestniczek poddanych ekspozycji na drgania niskiej częstotliwości -0,07% w porównaniu do grupy kontrolnej -0,02%. Spadek masy ciała i zawartości tkanki tłuszczowej w organizmie obserwowany jest nie tylko zaraz po treningu drganiami, ale również (przede wszystkim) w ciągu dziewiętnastu kolejnych dni trwania badań.

Wpływ na poziom aktywacji (Test Thayera)

Skala aktywacji Thayera uważana jest za narzędzie subiektywnej oceny nastroju. Wymiar Aktywacji Ogólnej (energia, wigor) związany jest z ogólną gotowością do działania, zdolnością przyswajania i interpretowania informacji oraz wykonywania konstruktywnych czynności. Wzrost w zakresie Aktywacji Ogólnej w grupie eksperymentalnej 5,18% był istotnie większy niż w grupie kontrolnej 1,57%. Wibracje podnoszą naszą gotowość do działania (pracy), co jest efektem pozytywnym. Wymiar Dezaktywacja/senność związany jest z ogólnym poczuciem zmęczenia, zniechęcenia, zaniechania działania. Wykazano spadek w zakresie tego wymiaru w grupie eksponowanej -3,74% przy jednoczesnym zachowaniu niemal wyjściowego poziomu w gru-

pie kontrolnej 0,35%. Spadek ten okazał się istotny statystycznie, co jest zjawiskiem pożądanym. Wymiar Dezaktywacji ogólnej opisuje stan rozluźnienia, zrelaksowania, otwartości na doznania. W grupie eksperymentalnej wystąpił wzrost dezaktywacji ogólnej (4,6%), podczas gdy wynik zmian w grupie kontrolnej pozostał praktycznie bez zmian (0,37%). Konkludując zwiększenie Aktywacji ogólnej (energia, wigor), Dezaktywacji ogólnej (rozluźnienie, zrelaksowanie) oraz zmniejszenie Dezaktywacji/senności (zmęczenie), świadczą o tym, że bodziec jest dobrze tolerowany i wyraźnie odczuwany przez badanego, ale nie wywołuje lęku, napięcia oraz zmęczenia.

4.5. Podsumowanie i perspektywy

Przeprowadzone badania i wykonane analizy wskazują, że wibracja całego ciała WBV (o ściśle określonych parametrach) jest treningiem podnoszącym sprawność funkcjonalną człowieka. Wyniki pracy wskazują, że ekspozycja drganiami ogólnymi 3,2 Hz jest ekwiwalentem wysiłku fizycznego. Może mieć szerokie zastosowanie od treningu sportowego po rekonwalescencję pacjentów (np. po zawałach, przeszczepach serca).

Trening wibracyjny można stosować w zapobieganiu i/lub rehabilitacji kilku chorób cywilizacyjnych m.in.: otyłości (spadek zawartości tkanki tłuszczowej), niedoboru ruchu oraz negatywnych skutków pozycji siedzącej (pozytywny wpływ na układ krwionośny oraz stabilność postawy). Ekspozycja drganiami może być nową formą codziennego treningu, który prowadzi do utrzymania organizmu odpowiedniej kondycji fizycznej (zwłaszcza osoby starsze) i psychicznej (wzrost poziomu aktywacji), a co za tym idzie do poprawy jakości życia człowieka.

Należy sprawdzić działanie bodźca w czasie znacznie dłuższym niż dziewiętnaście dni, co dało by dopiero ostateczną odpowiedź o działaniu omawianego bodźca. Powinny być prowadzone kolejne badania wpływu drgań na ludzi, ale z uwzględnieniem innych częstotliwości tak, aby dokładniej poznać to zjawisko i jego następstwa. Warto również, aby w owych badaniach uwagę zwrócono na możliwość wystąpienia reakcji niepożądanych ze strony organizmu ludzkiego. Jest to nierozdzielnie związane z bezpieczeństwem jakie powinien zapewniać bodziec wibracyjny by mógł być z powodzeniem stosowany jako uzupełnienie lub metoda w rehabilitacji medycznej czy treningu sportowym.

Badania wykazały pozytywny, a wręcz leczniczy wpływ dźwięku na człowieka. Dźwięk – hałas – może też szkodzić. Im powszechniejszy hałas, tym bardziej spada jakość życia ludzi.

Rozdział 5

Modelowanie hałasu wentylatorów

5.1. Wstęp

Zrównoważony rozwój to doktryna przyjmowana za podstawę współczesnej działalności człowieka i zakłada dbałość o środowisko naturalne jak i to stworzone sztucznie. Dbłość o środowisko naturalne jest dla wielu oczywista i wiąże się z minimalizacją emisji zanieczyszczeń, degradacji otoczenia pod kątem biologicznym, czy krajobrazowym. Z tym ostatnim pojęciem często wiążą się szczególne wyzwania. W szczególności zasada, mówiąca, że należy tak projektować sztuczne środowisko by podnosić jakość życia osób które będą z niego korzystały.

I chociaż obecnie dużo się robi by zachowywać unikalne zasoby środowiska, a nawet unikalne krajobrazy dźwiękowe, które rejestruje i udostępnia szerokiemu audytorium, to dalej istotne jest takie projektowanie maszyn i urządzeń by minimalizować ich negatywny wpływ na środowisko bytowania człowieka.

Z praktycznego punktu widzenia, zagadnienie modelowanie hałasu wentylatorów jest niezwykle istotne. Statystyki wskazują [60], że wentylatory są najbardziej rozpowszechnionym rodzajem maszyn przepływowych. Ich główne zadanie polega na wymuszaniu przepływu gazu w instalacji. Mogą też być wykorzystywane do transportu materiałów sypkich.

Z uwagi na pełnioną przez nie funkcję znajdują się praktycznie w każdej innej maszynie. Wspomagają intensywność wymiany ciepła oraz zapewniają odpowiedni komfort pracy czy życia ludzi i zwierząt.

Jednocześnie są urządzeniami, które generują hałas. W większości przypadków jest to hałas pochodzenia aerodynamicznego. Gdy stan urządzenia polega pogorszeniu, pojawia się hałas pochodzenia mechanicznego.

Z wyżej wymienionych powodów poświęca się coraz więcej czasu i środków, by opracowywane nowe konstrukcje wentylatorów cechowały się mniejszą mocą akustyczną, zaś konstrukcje istniejące poddaje się modernizacji.

Już od 2005 roku Unia Europejska podejmuje działania by obniżyć zużycie energii m.in. przez wentylatory. Od 2015 każda nowa konstrukcja musi spełniać wysokie wymagania dotyczące sprawności energetycznej czy to statycznej, czy całkowitej.

Warto też zauważyć, że od około 50 lat, wśród projektantów wentylatorów, panowało przekonanie, że punkt pracy o najwyższej sprawności jest też punktem w którym wentylator generuje najmniejsze poziomy hałas. Już jakiś czas temu udało się dowieść, że to przekonanie jest fałszywe [61], zatem trzeba zadbać o to, by w punkcie pracy odpowiadającym maksymalnej sprawności wentylator był źródłem hałasu o stosunkowo niskiej mocy.

5.2. Hałas wentylatorów

Prowadzone od wielu lat badania pozwoliły wskazać dominujące źródła hałasu wentylatorów. Zalicza się do nich między innymi [62]:

- turbulencje przepływu,
- zmienne siły powstające na powierzchniach łopatek na skutek przerywania wirów na tylnych krawędziach tychże łopatek,
- zmienne siły na powierzchniach łopatek pochodzące od przecinania turbulentnego śladu aerodynamicznego wlotowych aparatów kierujących,
- zmienne siły na języku i łopatkach pochodzące od ich współdziałania.

Poziom hałasu generowanego przez wentylatory zależy od wielu czynników, z których za najistotniejsze można uznać [60]:

- odpowiedni dobór wentylatora do instalacji,
- odpowiednia sprawność i wydajność,
- odpowiednie zaprojektowanie wlotu do wentylatora,
- odpowiednie warunki pracy.

Jako dominujące powody powstawania hałasu w wentylatorach można wymienić:

- niewyważenie mas wirujących,
- błędy nieosiowości;
- praca blisko częstości rezonansowych,
- zaburzenia natury aerodynamicznej,
- uszkodzenia łożysk,
- luzy.

Niewyważone masy wirujące powodują powstawania odśrodkowych sił natury bezwładnościowej, które można opisać równaniem (5.1)

$$B = m\omega^2 r \quad (5.1)$$

gdzie m jest wielkością masy niewyważonej, ω oznacza prędkość kątową elementów wirujących, r jest promieniem niewyważenia.

Siły odśrodkowe dają wymuszenia we wszystkich kierunkach w płaszczyźnie prostopadłej do osi wirnika. Częstotliwość tych drgań jest ściśle związana z prędkością kątową niewyważonych mas wirujących. Przy pewnych prędkościach obrotowych wały wirujące pracują w sposób niestabilny, wpadają w drgania o narastającej amplitudzie, co może bezpośrednio prowadzić do ich zniszczenia [62].

Z kolei drgania pochodzące od nieosiowości wałów charakteryzują się dużymi amplitudami na obudowach łożysk po obu stronach sprzęgła łączącego wały. Częstota drgań odpowiada prędkości kątowej wałów. Hałas pochodzenia mechanicznego silnie zależy od prędkości obrotowej wirników wentylatorów. Z tego powodu stosowane obecnie układy sterowania, które wykorzystują przekształtniki częstotliwości i zmieniają prędkość obrotową silników napędzających wentylatory pozwalają znacząco obniżyć poziom hałasu w czasie, gdy wentylator nie musi pracować z pełną mocą.

Można wymienić kilka czynników, które zostały zidentyfikowane jako te, które mają istotny wpływ na hałas pochodzenia aerodynamicznego. Niektóre z nich zostały wymienione poniżej.

- Czynniki natury konstrukcyjnej:
 - odległość obudowy spiralnej od wirnika, szczególnie szczelina w okolicy języczka, zaś w wentylatorach osiowych odległość wirnika od kierownic wlotowych czy wylotowych;
 - kształt krawędzi języczka;
 - wielkość szczeliny przywlotowej;
 - liczba łopat w palisadzie wirnika.
- Czynniki związane z postacią przepływu:
 - niestacjonarności w przepływie,
 - poziom turbulencji na wlocie do wentylatora i wielkość śladu turbulentnego urządzeń przed wirnikiem,
 - niestacjonarny wypływ czynnika z dyszy.

Odległość języczka obudowy od wirnika silnie wpływa na poziom generowanego hałasu tonalnego, można zauważyć, że wraz ze wzrostem tej odległości spada jego poziom. Jednocześnie ta odległość silnie wpływa na wielkość strat w wentylatorze, więc wpływa na sprawność wentylatora. Jak wynika z pracy Romika [63], bardzo ciekawym pomysłem jest zmiana kształtu języka, którą zaproponował Horvat [64], która powoduje zmniejszenie poziomu hałasu przy jednoczesnym podniesieniu sprawności. Odległość między języczkiem i wirnikiem nie powinna przekraczać 0,2 średnicy wirnika.

Ze względu na straty wolumetryczne wielkość szczeliny przywlotowej nie może przekraczać 0,006 średnicy zewnętrznej wirnika. Zmniejszenie tej szczeliny powoduje też zmniejszenie generowanego hałasu.

Liczba łopat w palisadzie wirnika wpływa na wielkość sił stacjonarnych i niestacjonarnych działających na wirnik. Oprócz zapewnienia odpowiedniej sprawności, właściwy dobór liczby łopat wpływa na poziom generowanego hałasu i oczywiście na jego strukturę tonalną. Według zaleceń liczba łopat w wirniku powinna mieścić się w zakresie 9–12 [60].

Przepływ turbulენტnej strugi czynnika przez wentylator powoduje pojawianie się niestacjonarnych sił na powierzchniach, które stykają się tym czynnikiem. Pojawiające się fluktuacje mogą być modelowane jako źródła dźwięku drugiego rzędu zwane dipolami. Ich moc akustyczna jest proporcjonalna do szóstej potęgi prędkości strugi, zgodnie z równaniem (5.2).

$$N \sim \frac{\rho u^6}{c^3} \cdot l^2 \quad (5.2)$$

gdzie u oznacza prędkość czynnika, l jest często pojawiającą się w mechanice płynów długością charakterystyczną, $c = \sqrt{\kappa \cdot p / \rho}$ – oznacza prędkość dźwięku w ośrodku (przy małych wartościach liczby Macha przyjmowana jako stała), κ to wykładnik izentropy, czyli stosunek ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu do ciepła właściwego przy stałej objętości, a p oznacza ciśnienie atmosferyczne.

To właśnie źródła dipolowe mają największy wkład w hałas generowany przez wentylatory.

Źródło masy, jak na przykład wypływ gazu z dyszy, może być modelowane źródłem rzędu pierwszego, czyli monopolem. Moc akustyczna takiego monopolu jest proporcjonalna do czwartej potęgi prędkości strugi, zgodnie ze wzorem (5.3).

$$N \sim \frac{\rho u^4}{c} \cdot l^2. \quad (5.3)$$

Z punktu widzenia ograniczania hałasu maszyn przepływowych, w tym wentylatorów, warto pamiętać, że hałas tych maszyn jest dwojakiego rodzaju:

- hałas szerokopasmowy – szum o stosunkowo wysokim poziomie,
- hałas tonalny – dyskretne prążki w widmie.

Hałas szerokopasmowy wynika z tworzenia się wirów na łopatkach wirnika czy elementów kierujących strugi czynnika. Hałas tonalny jest powodowany cyklicznymi pulsacjami strugi, wynikającymi najczęściej ze współpracy wirnika z elementami nieruchomej obudowy.

Źródła hałasu w wentylatorach różnią się w zależności od rodzaju wentylatora [62]. W analizowanym w tym rozdziale przypadku wentylatora osiowego źródła generowanego hałasu zostaną pokrótce omówione poniżej.

Zmienne siły na powierzchniach łopatek roboczych zależne od turbulentnego śladu w strudze napływającej z kierownic wlotowych. Na skutek działania tych sił pojawia się szerokopasmowy hałas o mocy akustycznej wyrażonej wzorem (5.4)

$$N \sim \rho u^3 M^3 S \quad (5.4)$$

gdzie S jest całkowitą powierzchnią łopatek roboczych.

Zmienne siły na powierzchniach aparatów prostujących strugi umieszczonych za łopatkami roboczymi. Wielkość tych sił zależy od poziomu turbulencji strugi opuszczającej wirnik i od odległości prostownic od wirnika. Dają hałas szerokopasmowy, którego poziom znacznie rośnie przy zmniejszaniu odległości między wirnikiem i prostownicami strug. Moc akustyczną emitowaną przez to zjawisko można opisać wzorem (5.5).

$$N \sim \rho u^3 M^3. \quad (5.5)$$

Zmienne siły na łopatkach kierownic i wirnika wynikające ze współpracy tych elementów konstrukcyjnych wentylatora osiowego. Hałas pochodzący od tych sił ma charakter tonalny, a jego częstotliwość podstawowa jest proporcjonalna do prędkości obrotowej zgodnie z zależnością (5.6).

$$f_i \sim n \quad (5.6)$$

W zależności od położenia kierownic wlotowych, emitowana w jednostce czasu energia akustyczna zależy liczby łopat, od kąta między łopatkami rotora i statora, a przede wszystkim od odległości między wirnikiem i kierownicą. Emitowaną moc akustyczną można oszacować za pomocą zależności (5.7).

$$N \sim \rho u^3 M^{2/3} \quad (5.7)$$

Oprócz elementarnych źródeł dźwięku, wynikających z zachowania strug przepływającego czynnika, hałas wentylatora zależy od mocy silnika napędowego.

Przedstawione teoretyczne zależności wskazują na możliwość szacowania mocy akustycznej, a co za tym idzie poziomów dźwięku wynikających z obecności wentylatorów, na podstawie ich znajomości zachowania czynnika. Ponieważ to zachowanie zależy bezpośrednio od parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych maszyny przepływowej, zatem wielu autorów poszukiwało takich uniwersalnych zależności, które mogłyby posłużyć do optymalizacji tych konstrukcji. Jak się okazało, chociaż moc emitowana przez pojedyncze źródła dźwięku zależy od parametrów takich jak poziom turbulencji, czy odległość między wirnikiem a kierownicami, to jednak te wielkości nie pojawiają się w sposób jawny w przytoczonych zależnościach.

Tradycyjne modelowanie hałasu aerodynamicznego wentylatorów prowadzono przez przypisywania poszczególnym źródłom dźwięku modelowych źródeł akustycznych, czyli monopoli, dipoli i kwadrupoli. Moce akustyczne poszczególnych źródeł modelowych wyraża się następującym wzorem (5.8)

$$N_a = \rho \frac{u^k}{c^{k-3}} l^2. \quad (5.8)$$

gdzie: k jest wykładnikiem równym dla monopoli, dipoli i kwadrupoli odpowiednio 4, 6, 8; natomiast l jest wymiarem charakterystycznym, ρ jest gęstością przelatującego płynu, v jego prędkością zaś c jest prędkością dźwięku w ośrodku. Chociaż większość źródeł w wentylatorze powinny stanowić źródła dipolowe (odpowiadające fluktuacji sił normalnych i stycznych na powierzchniach ograniczających) to jednak eksperymenty wykazały, że w obiektach rzeczywistych bardzo trudno jest wskazać precyzyjnie wykładnik występujący przy prędkości przepływu. Inną trudność stanowi zmienność prędkości w przepływie i w pobliżu powierzchni ścian.

Problem modelowania hałasu aerodynamicznego bywa rozwiązywany na co najmniej cztery sposoby

- zależności empiryczne i półempiryczne uwzględniające spiętrzenie Δp , strumień objętości, rzadziej moc napędu i prędkość obrotowa czy liczba Macha,
- analogie aeroakustyczne mające początek w pracach Lighthilla,
- metody hybrydowe wykorzystujące np. zlinearyzowane równania Eulera,
- bezpośrednie symulacje numeryczne – DNS (ang. *Direct Numerical Simulation*).

Poniżej zostaną one krótko scharakteryzowane.

5.3. Półempiryczne zależności dotyczące hałasu wentylatorów

Na podstawie przytoczonych zależności opisujących moce akustyczne elementarnych źródeł dźwięku i analizy wymiarowej opracowano zależności półempiryczne opisujące hałas wentylatorów. Dzięki przeprowadzeniu wielu eksperymentów różni autorzy wyznaczyli wartości współczynników w tych zależnościach.

Proste modele Schlendera i Klingenberga [79] wiążą moc akustyczną skorygowaną krzywą A z mocą silnika zasilającego wentylator.

$$L_N = 90 + 10 \log N_s \quad (5.9)$$

Zależność podana przez Engela [62],

$$L_N = 80 + 10 \log N_s + 10 \log \Delta p_c, \quad (5.10)$$

w której N_s to nominalna moc elektryczna silnika podana w [kW], Δp_c jest spiętrzeniem.

Te zależności są bardzo ogólne i w zamierzeniu samych autorów mogły mieć na celu tylko przybliżoną ocenę mocy akustycznej emitowanej przez urządzenie. Z praktycznego punktu widzenia, są to bardzo ważne zależności, ponieważ pozwalają ocenić stan środowiska pracy na podstawie informacji o wielkości zainstalowanych urządzeń. Niestety te zależności nie biorą pod uwagę takich czynników jak punkt pracy, parametry geometryczne czy wydajność.

Spośród tych bardziej skomplikowanych zależności, które uwzględniają przynajmniej niektóre wymienione czynniki, można przytoczyć na przykład:

- równanie Heckla i Müllera (5.11) [77], które dla docelowej grupy maszyn daje wyniki z błędem ± 4 [dB]

$$L_N = 40 + 10 \log \dot{V} + 20 \log \Delta p_c \quad (5.11)$$

gdzie \dot{V} jest objętościowym natężeniem przepływu.

- Innym równaniem, które daje wyniki zbieżne z eksperymentem jest równanie Beranka. Dla różnych rodzajów wentylatorów przyjmuje różne postacie
 - dla wentylatorów promieniowych ma postać:

$$L_N = \bar{L}_N + 10 \log \dot{V} + 20 \log \Delta p_c - 20 \quad (5.12)$$

- natomiast dla wentylatorów osiowych taką:

$$L_N = \bar{L}_N + 10 \log \dot{V} + 22.5 \log \Delta p_c - 22.5 \quad (5.13)$$

przy czym $\bar{L}_N = 57 \pm 4$ jest tak zwaną głośnością właściwą.

Beranek opracował też zależność na poziom mocy akustycznej zależną od parametrów geometrycznych i kinematycznych.

$$L_N = L_N^* + 50 \log u_2 + 20 \log D_2 \quad (5.14)$$

gdzie L_N^* jest właściwą głośnością wentylatora, u_2 to liniowa prędkość punktów na obwodzie wirnika o średnicy zewnętrznej D_2

- Innym badaczem zajmującym się hałasem wentylatorów był Judin, który opracował wzór

$$L_N = \bar{L}_N + 10 \log \dot{V} + 25 \log \Delta p_c - 25 \quad (5.15)$$

gdzie $\bar{L}_N = 45 \pm 4$ [dB].

— Znane jest też równanie Madisona [67]

$$L_N = \bar{L}_{NS} + 10 \log \left(\frac{\dot{V}}{\dot{V}_o} \right) + 20 \log \left(\frac{\Delta p_c}{\Delta p_{co}} \right) \quad (5.16)$$

gdzie $\bar{L}_{NS} = 37 \pm 4$ właściwym poziomem mocy akustycznej zalecanym przez VDI 2081, i jest stały dla danego rodzaju wentylatorów, $\dot{V}_o = 1$ referencyjne objętościowe natężenie przepływu, $\Delta p_{co} = 1$ spiętrzenie odniesienia.

— Równanie Regenscheita

$$L_N = L_{NR} + 10 \log \left[\dot{V} \cdot \Delta p_c \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \cdot \left(\frac{u_2}{c} \right)^2 \right] \quad (5.17)$$

gdzie $L_{NR} = 81$ jest właściwym poziomem mocy akustycznej, η sprawność wentylatora.

— Bommess [67] opracował równanie dla wentylatorów osiowych z łopatkami zagiętymi do tyłu. Jego zależność pozwala na wyznaczenie mocy akustycznej w pasmach oktaowych i tercjowych.

$$L_N = \bar{L}_{NS} + 10 \log \left(\frac{\dot{V}}{\dot{V}_o} \right) + 5 \cdot (\gamma - 1) \cdot \log \left(\frac{\Delta p_c}{\Delta p_{co}} \right) + \hat{\Delta}L(F) \quad (5.18)$$

gdzie $\bar{L}_{NS} = 154 - 24\gamma$, $\gamma = 4-6$ wykładnik przy liczbie Macha, $\hat{\Delta}L(F) = -c_1 - c_2 \log(St + c_3^2)$, $c_1 = 10$, $c_2 = 5$ są współczynnikami dla pasm tercjowych, zaś $c_1 = c_2 = 5$ dla pasm oktaowych, $c_3 = -0,6-0,6$, $St = f_m \cdot D_2/u_2$ jest liczbą Strouhala oraz f_m to częstotliwość.

— Inną zależność stosują badacze rosyjscy

$$L_N = 40 + 25 \log \Delta p_c + 10 \log \dot{V} \quad (5.19)$$

W pracy Engela, Piechowicza i Stryczniewicza [68] można znaleźć jeszcze inne zależności opisujące poziom mocy akustycznej wentylatorów. Dla kompletności zostaną one poniżej przytoczone. Pierwszą z nich jest rekomendacja VDI 2081 uzależnia poziom mocy od objętościowego natężenia przepływu oraz spiętrzenia w [hPa].

$$L_N = 45 + 10 \log \dot{V} + 20 \log \Delta p_c \quad (5.20)$$

$$L_N = 85 + 10 \log N + 10 \log \Delta p_c \quad (5.21)$$

$$L_N = 125 + 20 \log N - 10 \log \dot{V} \quad (5.22)$$

Na podstawie prac Fortuny [60], można stwierdzić, że najlepsze wyniki uzyskuje się stosując wzory podane przez Bommessa (5.18). Zaś dla wentylatorów wysokociśnieniowych, a więc o konstrukcji promieniowej, lepiej sprawdza się wzór podany

przez Regenscheita (5.17), ponieważ inne wzory przeszacowują poziomy mocy akustycznej.

Jak łatwo się można było przekonać, przedstawione powyżej półempiryczne zależności określające moc akustyczną wentylatorów (wzory (5.9)–(5.22)) uwzględniają moc napędu N , spiętrzenie Δp , strumień objętości \dot{V} i mają najczęściej postać następującej zależności:

$$L_N = A + 10 \log N^B + 10 \log \Delta p^C + 10 \log \dot{V}^D \quad (5.23)$$

w której poszczególne stałe A , B , C oraz D są wyznaczane na drodze eksperymentalnej. Każda zmiana zasad konstruowania wentylatorów powoduje, że te stałe przestają być aktualne i wymagają kolejnych eksperymentów, by opracowane wzory mogły być użyteczne. Okazuje się też, że stosowane obecnie układy sterowania prędkością obrotową wentylatorów powodują, że opisane zależności nie dają prawidłowych wyników. A nawet każdy typoszereg wentylatorów wymaga dostrajania modelu w takiej postaci. Co prawda za używaniem zależności postaci 5.23 przemawia fakt, iż różnych zestawach parametrów konstrukcyjnych (β_1 , β_2 , D_1 , D_2 , b_1 , b_2) można uzyskać tą samą wydajność i spiętrzenie [80]. Jednak dają one mocno przybliżone wyniki i ujmują nie tylko hałas pochodzenia aerodynamicznego, ale też mechanicznego.

Z tego powodu do modelowania hałasu generowanego przez maszyny przepływowe używa się metod obliczeniowej aeroakustyki. Rozwiązanie zadania generowania i propagacji zaburzenia akustycznego w ośrodku czasem wymaga zrealizowania kilku kroków:

- wyznaczenie rozkładu ciśnień i prędkości płynu – chwilowe fluktuacje muszą być znane, by można było wyznaczyć składniki źródłowe równań akustycznych,
- wykorzystać analogię aeroakustyczną by wyznaczyć źródła sygnału akustycznego,
- rozwiązać problem propagacji zaburzenia akustycznego w przepływającym płynie.

Następne podrozdziały będą dotyczyły poszczególnych etapów rozwiązywania problemu modelowania hałasu.

5.4. Numeryczne modelowanie przepływu

Wykorzystując osiągnięcia mechaniki płynów, w ramach której opracowano układy równań różniczkowych cząstkowych, które opisują ruch ośrodka ciągłego jakim jest płyn (ciecz lub gaz), można obliczyć zachowanie płynu przy przepływie przez skomplikowany układ jakim jest maszyna przepływowa.

Równania: ciągłości (5.24), Naviera–Stokesa (5.25) opisują ruch każdego płynu. W przypadku przyjęcia stałej gęstości, co oznacza płyn nieściśliwy, nie jest potrzebne dodatkowe równanie. Jeżeli zaś uwzględnia się ściśliwość, to koniecznie należy dodać równanie stanu, na przykład w postaci (5.26).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (5.24)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v}) + \rho \mathbf{F} \quad (5.25)$$

$$p(\rho) = \rho c^2 \quad (5.26)$$

gdzie ρ oznacza gęstość, \mathbf{v} to wektor prędkości, μ oznacza lepkość dynamiczną płynu, p to ciśnienie zaś \mathbf{F} to siła masowa działająca na płyn, wyrażona na jednostkę masy.

Równania (5.24)–(5.25) to nieliniowe równania różniczkowe cząstkowe, które obecnie rozwiązuje się numerycznie. Jednak rozwiązanie tych równań przy większych prędkościach ruchu, bez przyjmowania uproszczeń, nastęrcza dużych kłopotów związanych z wymagana bardzo gęstą siatką i małym krokiem czasowym – taka metoda nazywana jest bezpośrednią symulacją numeryczną (ang. *Direct Numerical Simulation*). W związku z tym wprowadza się uproszczenia polegające na uśrednianiu w czasie lub przestrzeni.

Pierwszym pomysłem było uśrednianie w czasie – powstały równania Naviera–Stokesa z uśrednianiem Reynoldsa, które mają następującą postać

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{\mathbf{v}}}{\partial t} + \bar{\mathbf{v}} \cdot \nabla \bar{\mathbf{v}} \right) = -\nabla \bar{p} + \mu \nabla^2 \bar{\mathbf{v}} + \mu \nabla^2 \cdot \bar{\mathbf{v}} + \rho \mathbf{F} - \rho \nabla \mathbf{T} \quad (5.27)$$

Wprowadzone oznaczenie \mathbf{T} oznacza tensor uśrednionych prędkości pobocznych $\mathbf{T} = u_i \bar{u}_j$, po pomnożeniu przez gęstość daje tzw. tensor naprężeń Reynoldsa. Równanie (5.27) nazywane jest angielskim skrótem RANS (ang. *Reynolds Averaged Navier–Stokes*). Niestety równania Naviera–Stokesa po uśrednieniu Reynoldsa wymagają domknięcia, które pozwoli wyznaczyć składniki tensora naprężeń Reynoldsa.

Domknięcie uśrednionych równań Naviera–Stokesa wymaga zastosowania tak zwanych modeli turbulencji. Są to dodatkowe równania, które pozwalają wyznaczyć tensor naprężeń Reynoldsa. Mogą one być tzw. zerorównaniowe, jednorównaniowe, dwurównaniowe i oczywiście mogą mieć więcej równań.

W niniejszym rozdziale zostanie przedstawiony sposób modelowania hałasu wentylatora osiowego, gdzie wykorzystany zostanie model $k\text{-}\omega$ SST. Z tego powodu zostaną opisane modele turbulencji, które są wykorzystywane w trakcie obliczeń.

Model $k\text{-}\varepsilon$ składa się z dwóch dodatkowych równań, które reprezentują odpowiednio, k – energię kinetyczną turbulencji i ε – dyssypację tej energii. Jest jednym z naj-

starszych modeli turbulencji. Używany jest przy analizie przepływów charakteryzujących się wysoką liczbą Reynoldsa. Aby otrzymać wymagane wartości należy rozwiązać równania transportu kolejno dla energii kinetycznej turbulencji (równanie 5.28) i dyssypacji energii (równanie 5.29).

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad (5.28)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \rho v_k \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right] + \frac{c_1 \varepsilon}{k} \mu_t \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5.29)$$

gdzie μ_t jest tak zwaną lepkością turbulentną opisaną wzorem $\mu_t = c_\mu \rho k^2 / \varepsilon$, stałe w modelu przyjmują następujące wartości $c_1 = 1,44$, $c_2 = 1,92$, $c_\mu = 0,09$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$. Podstawową wadą tego modelu turbulencji jest to, że w obecności dużych wartości gradientu prędkości lub ciśnienia zawyża poziom turbulencji, co prowadzi do błędnych wyników. Oprócz tradycyjnego modelu $k-\varepsilon$ są stosowane jego odmiany, w których próbowano obejść opisane ograniczenie.

Model $k-\omega$

Podobnie jak w przypadku modelu $k-\varepsilon$, model ten zawiera dwa równania, z czego pierwsze, dotyczące k – energii kinematycznej turbulencji, natomiast ω określa prędkość dyssypacji energii turbulencji przypadającą na jednostkę energii kinetycznej turbulencji. Wartości k i ω , można pozyskać rozwiązując poniższe równania (5.30) oraz (5.31).

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma^* \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (5.30)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma \mu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (5.31)$$

gdzie $\mu_T = \rho k / \omega$, zaś stałe $\alpha = 0,556$, $\beta = 0,075$, $\beta^* = 0,09$, $\sigma = 0,5$ oraz $\sigma^* = 0,5$. Model $k-\omega$ znacznie lepiej odwzorowuje zachowanie czynnika w obszarach w których na płyn działają znaczne siły. Wada tego modelu jest to, że rozwiązanie równania transportu ω (5.31) silnie zależy od wartości współczynnika ω w przepływie swobodnym. Z tego powodu został opracowany model $k-\omega$ SST, który w pobliżu powierzchni ograniczających używa modelu $k-\omega$, zaś w większej odległości od brzegów używa modelu $k-\varepsilon$.

Rozwiązywanie równań Naviera–Stokesa zazwyczaj odbywa się z wykorzystaniem wyspecjalizowanego oprogramowania. Najczęściej w numerycznej mechanice

płynów używana jest metoda objętości skończonych. Wynika to z jej właściwości – w naturalny sposób zachowuje bilanse w każdej z komórek siatki. Niestety, z powodu stosowania funkcji interpolacyjnych niskich stopni, do uzyskania dokładnych wyników konieczne jest nałożenie odpowiednio gęstej siatki.

Po rozwiązaniu równań dynamiki płynu uzyskuje się zbiór wartości ciśnienia i prędkości w barycentrum każdej komórki. Kolejnym krokiem przy hybrydowej metodzie modelowania hałasu aerodynamicznego jest wyznaczenie mocy i położenia źródeł akustycznych w przepływającym płynie.

5.5. Analogie aeroakustyczne

Analogie aeroakustyczne pozwalają na wyznaczenie składników źródłowych pochodzących od zaburzeń przepływającej strugi. W niniejszym podrozdziale skrótowo omówiono podstawy wykorzystania analogii aeroakustycznych.

Przełomem w aeroakustyce było opracowanie analogii aeroakustycznej przez Lighthilla [74]. Wykorzystując podejście Lighthilla i rozwijając je, kolejni naukowcy rozwijali coraz bardziej wysublimowane teorie dotyczące sprzężenia pola przepływu z polem akustycznym.

5.5.1. Analogia Lighthilla

Tematem pracy wydanej w 1952 r. przez Lighthilla, była analiza zachowania płynu wpływającego z dużą prędkością do nieruchomego ośrodka. Oprócz tego Lighthill założył też, że fala akustyczna nie ma wpływu na zachowanie przepływającego płynu.

Lighthill wyszedł od równania Naviera–Stokesa i przekształcił uzyskując po lewej stronie równanie falowe, a po prawej składnik odpowiadający za wzbudzenie zaburzeń akustycznych (patrz równ. (5.32)). W zapisie wskaźnikowym analogia aeroakustyczna Lighthilla została przedstawiona poniżej.

$$\frac{\partial^2(\rho - \rho_0)}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2(\rho - \rho_0)}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (5.32)$$

Po prawej stronie równania (5.32) stoi druga pochodna mieszana po współrzędnych przestrzennych z tensora, nazwanego na cześć Lighthilla:

$$T_{ij} = \rho v_i v_j + \delta_{ij} [(p - p_0) - c^2(\rho - \rho_0)] - e_{ij} \quad (5.33)$$

gdzie składnik

$$e_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) \quad (5.34)$$

z kolei μ jest lepkością dynamiczną a δ_{ij} oznacza deltę Kroneckera. Wartości zmiennych są wartościami chwilowymi, zaś ρ_0 oraz p_0 są średnimi wartościami gęstości i ciśnienia płynu.

Tensor Lighthilla, przy założeniu nieściśliwego, izentropowego i newtonowskiego płynu, czyli w większości praktycznych przypadków przy małych wartościach liczby Macha, może być przybliżony za pomocą naprężeń Reynoldsa w postaci

$$T_{ij} \approx \rho v_i v_j \quad (5.35)$$

Podstawową słabością analogii aeroakustycznej Lighthilla jest to, że uwzględnia jedynie dźwięk generowany na skutek turbulencji w płynie. Te źródła są modelowane jako kwadrupole, zaś ich sprawność promieniowania jest dosyć niska.

5.5.2. Analogia Ffowcsa–Williamsa Hawkingsa

Kolejna analogia, zwana od nazwisk naukowców, którzy ją opracowali analogią Ffowcsa-Williamsa Hawkingsa (FW-H), bazuje na równaniach Lighthilla. Źródłem generowanego dźwięku jest w tym przypadku ograniczona powierzchnia, która znajduje się na drodze przepływu płynu. Analogia ta jest opisana równaniem (5.36).

$$\frac{\partial^2(\rho - \rho_0)}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2(\rho - \rho_0)}{\partial x_i^2} = \frac{\partial}{\partial t} [Q_n \delta(f)] - \frac{\partial}{\partial x_i} [L_i \delta(f)] + \frac{\partial^2}{\partial x_i x_j} [T_{ij} H(f)] \quad (5.36)$$

Poszczególne wyrazy równania (5.36) rozwija się zgodnie z poniżej przytoczonymi równaniami (5.37) oraz (5.38).

$$Q_n = Q_i n_i = [\rho_0 u_i + \rho(v_i - u_i)] n_i \quad (5.37)$$

$$L_i = L_{ij} n_j = [P_{ij} + \rho v_i (v_j - u_j)] n_i \quad (5.38)$$

Symbol $\delta(f)$ został wykorzystany by opisać wartości ciśnień i prędkości względnych na samej powierzchni ograniczającej analizowany przepływ stanowiący źródło sygnału aeroakustycznego. Ograniczona powierzchnia wykorzystywana w trakcie obliczeń jest opisana zależnością $f(x, t) = 0$ oraz $n_i = \nabla f$, i jest wektorem normalnym skierowanym na zewnątrz powierzchni f . Wielkość u_i odpowiada prędkości powierzchni f , a v_i prędkości przepływu płynu przy powierzchni f . Pierwszy składnik po prawej stronie równania (5.36) opisuje monopole, drugi dipole zaś trzeci kwadrupole stanowiące źródła hałasu aerodynamicznego. Uogólniony tensor Lighthilla $T_{ij} H(f)$ jest równy tensorowi Lighthilla na zewnątrz powierzchni występujących w obszarze analizy, oraz zeruje się w obszarach otoczonych tymi powierzchniami, co zostało zapisane z wykorzystaniem funkcji Heaviside'a. Wielkość

$$P_{ij} = p \delta_{ij} + \mu \left(-\frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right)$$

jest tensorem naprężeń w płynie.

Po wprowadzeniu ciśnienia akustycznego $p' = p - p_0$, gęstości związanej z zaburzeniem akustycznym $\rho' = \rho - \rho_0$ i wykorzystaniu związku $p' = \rho' c_0^2$ można równanie (5.36) zapisać w postaci (5.39).

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 p'}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \{T_{ij} H(f)\} - \frac{\partial}{\partial x_i} \{ |P_{ij} n_j + \rho v_i (v_n - u_n)| \delta(f) \} + \frac{\partial}{\partial t} \{ |\rho_0 u_n + \rho (v_n - u_n)| \delta(f) \} \quad (5.39)$$

Indeksy $(\cdot)_n$ oznaczają składowe normalne do analizowanej powierzchni. Ponieważ teoria Ffowcsa-Williamsa i Hawkingsa nie stawia takiego wymagania, by powierzchnia ograniczająca przepływ była nieprzepuszczalna, to można równanie (5.39) stosować do powierzchni, przez które płyn przenika. Mówi się wtedy o sformułowaniu równań FW-H dla powierzchni przepuszczalnych.

Formalne rozwiązanie równania (5.36) dla zaburzeń gęstości ρ' można zapisać w postaci (5.40).

$$\rho'(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_{\Omega} \frac{T_{ij} \left(\mathbf{y}, t - \frac{|\mathbf{x}-\mathbf{y}|}{c_0} \right)}{|\mathbf{x}-\mathbf{y}|} d\mathbf{y} - \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial}{\partial x_i} \int_{\Gamma} \frac{P_{ij} n_j \left(\mathbf{y}, t - \frac{|\mathbf{x}-\mathbf{y}|}{c_0} \right)}{|\mathbf{x}-\mathbf{y}|} d\mathbf{y} + \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Gamma} \frac{\rho_0 v_n \left(\mathbf{y}, t - \frac{|\mathbf{x}-\mathbf{y}|}{c_0} \right)}{|\mathbf{x}-\mathbf{y}|} d\mathbf{y} \quad (5.40)$$

Obszary całkowania Ω oraz Γ odnoszą się odpowiednio do objętości zawartej w powierzchni $f = 0$ oraz do samej tej powierzchni. Widać, że źródła akustyczne stanowią trzy całki, z czego dwie są powierzchniowe a jedna objętościowa. Przy czym dla przepływów w których liczba Macha przyjmuje małe wartości wkład całki objętościowej jest niewielki i można ją pominąć bez popełniania większych błędów. Farassat [75] podał sformułowania numeryczne, które pozwalają stosunkowo wygodnie wyznaczyć poszczególne składniki równań Ffowcsa-Williamsa i Hawkingsa.

Pod pewnymi względami metoda Ffowcsa-Williamsa i Hawkingsa jest podobna do tradycyjnej metody związanej z zastosowaniem całki Kirchhoffa. Równanie falowe z wykorzystaniem całki Kirchhoffa można zapisać jako

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 p'}{\partial x_i^2} = - \left(\frac{\partial p'}{\partial t} \frac{M_n}{c_0} \right) \delta(f) - \frac{\partial}{\partial t} \left[p' \frac{M_n}{c_0} \delta(f) \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} [p' n_i \delta(f)] \quad (5.41)$$

gdzie $M_n = v_n/c_0$ jest liczbą Macha dla poruszającej się powierzchni. Powierzchnia $f = 0$ powinna otaczać wszystkie źródła dźwięku. W przeciwieństwie do FW-H nie

można poszczególnym składnikom po prawej stronie wzoru (5.41) przypisać poszczególnych składowych fizycznych odpowiedzialnych za generowanie fali akustycznej.

Różnica między modelem Ffowcsa-Williamsa i Hawkingsa a całką Kirchhoffa sprowadza się do składnika (5.42) [81].

$$\frac{\partial^2 \rho u_i u_j}{\partial x_i \partial x_j} H(f) \quad (5.42)$$

Zatem jeżeli analizowana powierzchnia została wybrana poza obszarem silnych nieliniowości w przepływie, składnik stanowiący różnicę powinien zanikać. W przeciwnym przypadku stosowanie całki Kirchhoffa prowadzi do znacznych błędów.

Zarówno analogia aeroakustyczna FW-H, jak i całka Kirchhoffa wymagają znajomości wartości chwilowych prędkości i ciśnień na powierzchniach, na których jest przeprowadzane całkowanie. Z tego powodu konieczne jest użycie metody, która pozwoli na uzyskanie wartości chwilowych tych wielkości – na przykład LES, DES czy DNS. Ponieważ obliczenia te są bardzo czasochłonne i wymagają znacznych zasobów opracowano metodę stochastycznego generowania pola prędkości do celów modelowania hałasu aerodynamicznego (ang. *Stochastic Noise Generation and Radiation*).

5.6. Syntezowanie pola prędkości chwilowych

Przestrzenne pole prędkości jest syntezowane za pomocą metody opisanej przez Kraichnana i poprawionej przez Karweita i innych. Metoda polega na tym, iż generuje się losowe pole prędkości, opisywane jako skończona suma dyskretnych modów Fourierowskich. Takie trójwymiarowe pole jednorodnych izotropowych turbulencji jest zamrożone w czasie. Metoda daje losowe pole prędkości o właściwych charakterystykach przestrzennych. Zatem zadanie można sformułować następująco: zbudować pole prędkości turbulentnej, o energii kinetycznej turbulencji równej K i prędkości rozpraszania (dyssypacji) ε . Ponieważ losowe pola prędkości chwilowych będą różne dla każdej z chwil czasowych, można zatem będzie traktować to pole jako zmienną losową. Każda realizacja tej zmiennej losowej pozwoli wyznaczyć jeden obraz źródeł akustycznych. Z tak uzyskanych stochastycznych pól prędkości można zbudować szeregiów czasowych.

Trójwymiarowy rozkład Fouriera turbulentnego jednorodnego izotropowego pola turbulentnych fluktuacji prędkości w zadanym punkcie \mathbf{y} można przeprowadzić następująco.

$$\mathbf{v}_t(\mathbf{y}) = \int \tilde{\mathbf{v}}_t(\mathbf{k}) e^{j\mathbf{k} \cdot \mathbf{y}} d\mathbf{k} \quad (5.43)$$

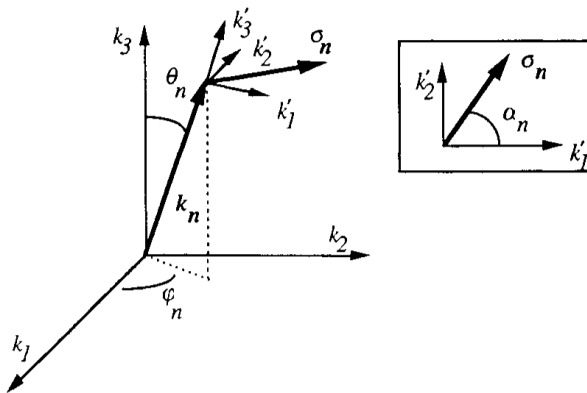
gdzie \mathbf{k} jest wektorem falowym $j = \sqrt{-1}$ jest jednostką urojoną. Całkę z równania (5.43) można przybliżyć skończoną sumą N modów i uzyskać następujące wyrażenie

$$\mathbf{v}_t(\mathbf{y}) = 2 \sum_{n=1}^N \tilde{v}_{tn} \cos(\mathbf{k}_n \cdot \mathbf{y} + \Psi_n) \boldsymbol{\sigma}_n \quad (5.44)$$

gdzie \tilde{v}_{tn} , Ψ_n oraz $\boldsymbol{\sigma}_n$ są amplitudami, fazami i kierunkami n -tego modu związanego z wektorem falowym \mathbf{k}_n . Co więcej dla nieściśliwego pola prędkości turbulენტnej, zależność $\partial v_{ti} / \partial y_i = 0$ wymaga by

$$\mathbf{k}_n \cdot \boldsymbol{\sigma}_n = 0, \quad n = 1, \dots, N \quad (5.45)$$

co oznacza, że w przestrzeni spektralnej, wektor jednostkowy $\boldsymbol{\sigma}_n$ jest zawsze prostopadły do wektora falowego \mathbf{k}_n a jego pozycja jest określona za pomocą kąta α_n . Wektor falowy \mathbf{k}_n może być opisany za pomocą współrzędnych sferycznych k_n , ϕ_n , θ_n (patrz rys. 5.1).



Rys. 5.1. Zależności geometryczne dotyczące wektora falowego \mathbf{k} [65]

Jednorodne, izotropowe losowe pole prędkości uzyskuje się wybierając odpowiednie funkcje rozkładu gęstości prawdopodobieństwa dla zmiennych losowych ϕ_n , θ_n , Ψ_n oraz α_n . Można wykazać, że powinny to być rozkłady jednostajne o wartościach $P(\phi_n) = \pi/2$, $P(\Psi_n) = 1/\pi$. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa dla zmiennej θ_n jest dany sinusoidą $P(\theta_n) = 1/2 \sin \theta_n$.

Aby opisać dokładnie pole prędkości (5.44) konieczne jest określenie amplitudy \tilde{v}_{tn} każdego modu Fouriera. Średnia arytmetyczna (oznaczana jako $\langle \cdot \rangle$) z $1/2 v_{ti} v_{ti}$ jest energią kinetyczną turbulencji K , i zgodnie z (5.44) wyraża się następującą zależnością:

$$K = \sum_{n=1}^N \tilde{v}_{tn}^2 \quad (5.46)$$

Jednorodna izotropowa turbulencja jest charakteryzowana przez trójwymiarowe widmo $E(k)$ które właściwości opisane wzorami (5.47) oraz (5.48).

$$\int_0^{\infty} E(k)dk = K \quad (5.47)$$

$$2\nu \int_0^{\infty} k^2 E(k)dk = \varepsilon \quad (5.48)$$

Amplituda \tilde{u}_{1n} każdego modu jest równa $\sqrt{E(k_n)\Delta k_n}$. Można użyć zmodyfikowanego widma Von Karmana $E(k)$, przedstawionego zależnością (5.49) do symulacji całego zakresu widmowego.

$$E(k) = A \frac{\frac{2}{3}K}{k_e} \frac{\left(\frac{k}{k_e}\right)^4}{\left[1 + \left(\frac{k}{k_e}\right)^2\right]^{\frac{17}{6}}} e^{-2\left(\frac{k}{k_{Kol}}\right)^2} \quad (5.49)$$

Obydwa parametry A oraz k_e są wyznaczane na podstawie zależności (5.47) i (5.48) podczas gdy k_{Kol} jest liczbą falową Kołmogorowa, definiowaną jako $(\varepsilon/\nu^3)^{1/4}$. Widmo osiąga maksimum dla k_e .

Przypisanie mocy widmowej do skończonej liczby N modów, można zrealizować wykorzystując logarytmiczny rozkład N liczb falowych. W ten sposób uzyskuje się lepszą dyskretyzację mocy dla liczb falowych o niewielkich wartościach, związanych z większymi wirami zawierającymi duże ilości energii. Krok logarytmiczny Δk_l takiego podziału jest dany zależnością

$$\Delta k_l = \frac{\ln k_N - \ln k_1}{N - 1} \quad (5.50)$$

oraz

$$k_n = e^{\ln k_1 + (n-1)\Delta k_l} \quad (5.51)$$

Liczba falowa $k_1 = 2\pi/L$ odpowiada największym wirom (L jest największą skalą wirów) zaś $k_N = (\varepsilon/\nu^3)^{1/4} = k_{Kol}$ określa liczbę falową Kołmogorowa.

Przy zwiększaniu liczby modów N oraz próbek N_r różnica między teorią a obliczeniami symulacyjnymi ulega zmniejszeniu. Dla $N = 200$ modów oraz $N_r = 1000$ wyniki symulacji są dostatecznie zgodne z pomiarami [66].

Po wyznaczeniu wartości chwilowych prędkości można przystąpić do analizowania rozkładu pola akustycznego w falowodzie i jego otoczeniu. Do analizy propagacji fali akustycznej zostanie wykorzystane równanie Helmholtza, które zostanie rozwiązane metodą elementów skończonych.

5.7. Obiekt

Analizowanym obiektem jest kanał wentylatora o przekroju okrągłym i średnicy wewnętrznej wynoszącej $d = 230$ mm. Na rysunku 5.2 przedstawiono model geometryczny analizowanego problemu. Dla poprawienia czytelności rysunku ścianki kanału zostały przedstawione jako przezroczyste. Wewnątrz kanału znajduje się wentylator osiowy, który przy prędkości obrotowej 2850 obr/min ma wydajność 380 m³/h wymuszający przepływ powietrza. Hałas pochodzenia aerodynamicznego pochodzi od interakcji wirnika wentylatora i przepływającego czynnika.

W modelu geometrycznym pominięto elementy mocujące wentylator we wnętrzu kanału. Dla zmniejszenia stopnia skomplikowania modelu zostały pominięte układy kierownicze i ewentualne elementy prostujące strugi.

Rysunek 5.3 przedstawia fragment rozwinięcia palisady wirnika wentylatora. Zaznaczono kąty charakterystyczne. W analizowanym wirniku kąty β_1 i β_2 wynoszą odpowiednio 13,4° oraz 20°. Średnica piasty wirnika wynosi 100 mm zaś sam wirnik ma sześć łopat.

Analiza nie obejmuje zachowania płynu w bezpośredniej bliskości wentylatora.

5.8. Model numeryczny

Cała objętość wypełniona czynnikiem została zdyskretyzowana. Model składa się z trzech stref. Dwie strefy: wlotowa i wylotowa są nieruchome, natomiast strefa otaczająca sam wirnik jest strefą obrotową. Ruch obrotowy wirnika został uwzględniony w obliczeniach metodą *sliding mesh*, która polega na tym, że w każdym kroku czasowym następuje przesunięcie kątowe strefy obrotowej o kąt wynikający z wielkości kroku czasowego i prędkości obrotowej. Chociaż wykorzystanie metody MRF (ang. *Multiple Reference Frame*) pozwoliłoby uzyskać wyniki znacznie szybciej, byłyby to wyniki dla stanu ustalonego, w jednym położeniu wirnika wentylatora. Wybrana metoda pozwoliła uzyskać zmienne w czasie wartości prędkości, energii i szybkości dyssypacji energii kinetycznej turbulencji.

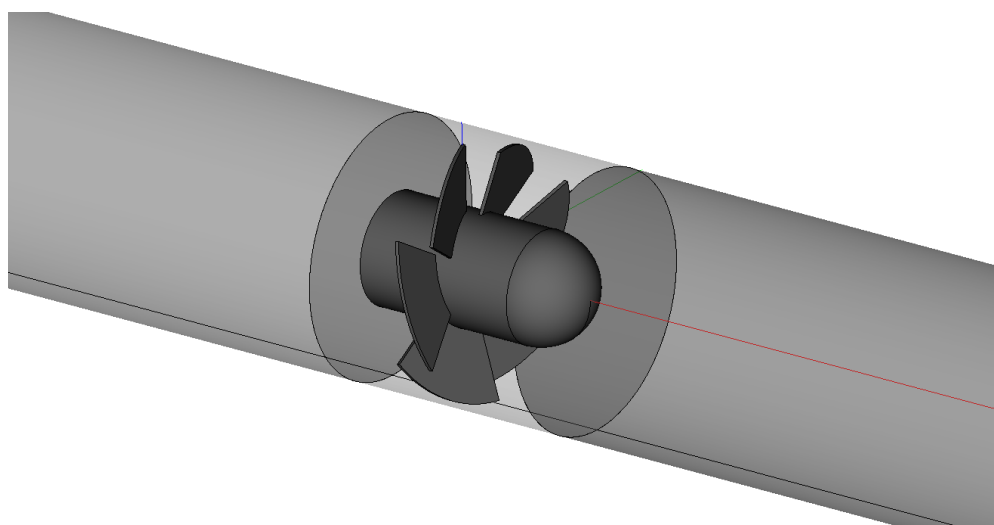
Siatka obliczeniowa wokół wirnika została przedstawiona na rysunku 5.4. Największe elementy mają długość boku około 4 mm. Na etapie modelowania założono, że warstwa przyścienna będzie modelowana za pomocą tzw. funkcji przyściennych, co pozwoliło na zmniejszenie rozmiarów modelu.

Wygenerowana siatka miała około 700 000 komórek, z czego około 300 000 przypadła na strefę obrotową.

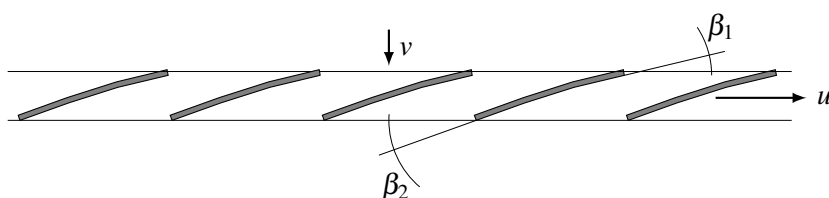
Bezwymiarowy współczynnik charakteryzujący grubość pierwszej warstwy komórek, a tym samym charakteryzujący zdolność siatki do odwzorowania warstwy przyściennej współczynnik y^+ zawierał się w granicach 30–100.

Zastosowano model płynu nieściśliwego. Ponieważ liczba Reynoldsa w kanale przed i za wentylatorem wynosiła około 50000, przyjęto, że przepływ jest turbulentny. Wykorzystano uśrednione w czasie równania Naviera–Stokesa (RANS) do wyznaczenia wartości prędkości i ciśnień w każdej komórce obliczeniowej. Do domknięcia układu uśrednionych równań Naviera–Stokesa przyjęto model turbulencji $k-\omega$ SST, który stanowi swego rodzaju standard przy obliczeniach zachowania czynnika w maszynach przepływowych.

Modelowanie zjawisk aeroakustycznych wymaga uwzględnienia wielu czynników, które zazwyczaj mogą być pomijane przy modelowaniu zjawisk zachodzących przy nieruchomym medium.

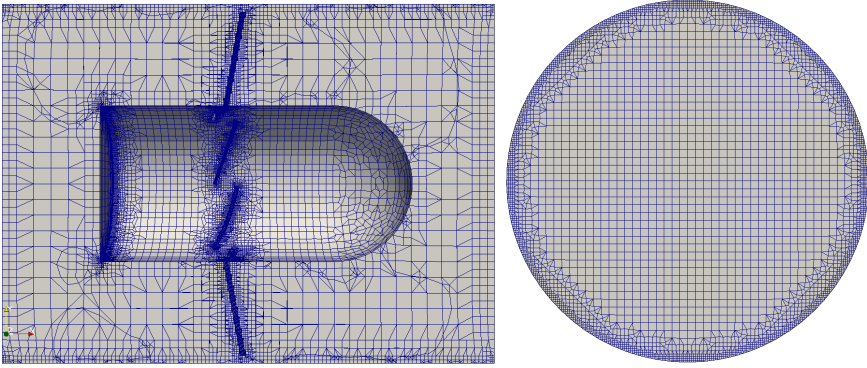


Rys. 5.2. Widok analizowanego wentylatora



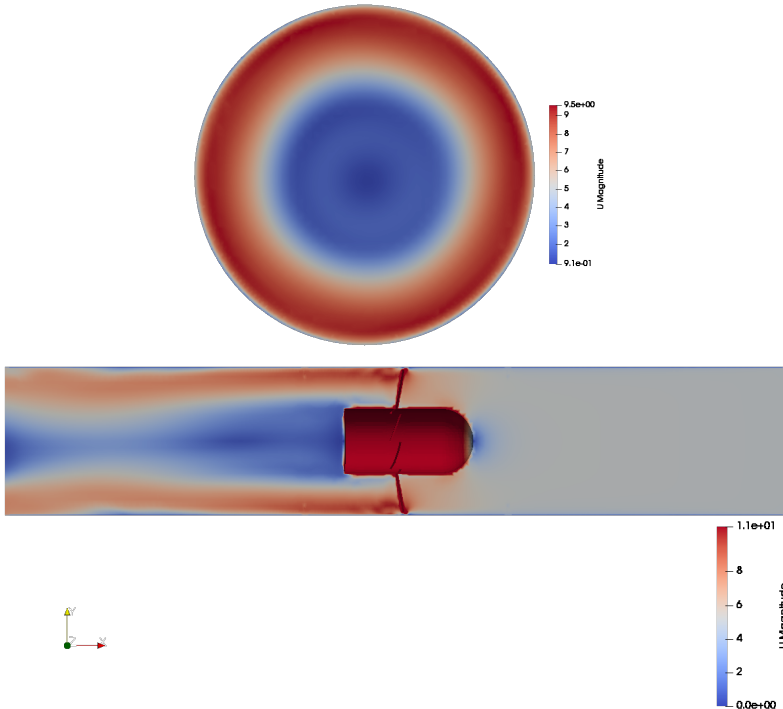
Rys. 5.3. Geometria palisady wentylatora

Przykładowe wyniki obliczeń dla czasu $t = 2$ s przedstawiają rysunki 5.5, oraz . Jak już wspomniano w opisie teoretycznym analizę przeprowadza się w kilku etapach.

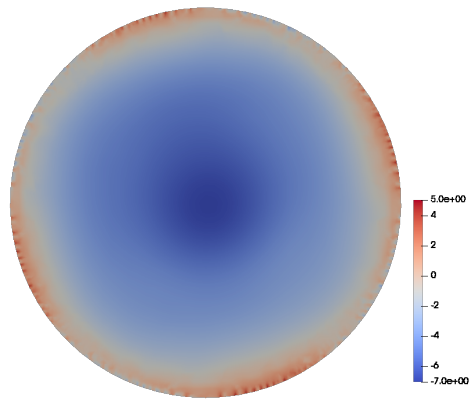


Rys. 5.4. Widok siatki obliczeniowej objętości skończonych strefy obrotowej

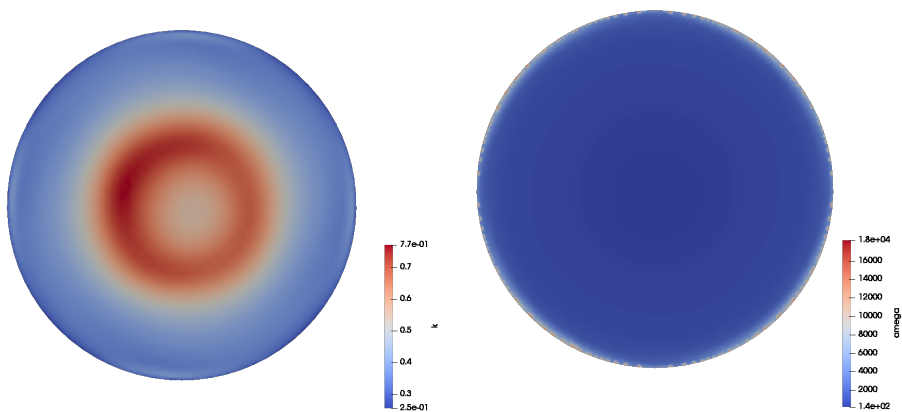
Pierwszym jest wyznaczenia uśrednionych prędkości i energii kinetycznej turbulencji w wybranym obszarze. Na podstawie wyznaczonych rozkładów parametrów przepływu zostały wyznaczone wielkości obszarów o jednorodnych parametrach turbulencji i w nich syntezowano pola fluktuacji prędkości.



Rys. 5.5. Rozkłady średniej prędkości w kanale wentylatora



Rys. 5.6. Rozkład średniego ciśnienia w przekroju poprzecznym wentylatora kanału wentylatora



Rys. 5.7. Rozkłady energii kinetycznej turbulencji i szybkości dyssypacji w przekroju poprzecznym kanału wentylatora

Następny etap polega na wyznaczeniu pól chwilowych prędkości turbulentnych, które pozwolą na wyznaczenie składników źródłowych za pomocą analogii Ffowcsa–Williamsa i Hawkinsa. Ostatni etap wiąże się z rozwiązaniem zadania propagacji fali w falowodzie i w otoczeniu, dla wybranego zakresu częstotliwości.

5.9. Źródła akustyczne

Wyznaczenie składników związanych z emisją akustyczną rozpoczyna się od wyznaczenia obszarów o wymiarach związanych z lokalnymi skalami turbulencji.

$$\Delta l_y = \frac{\overline{v_{t1}^2}^{3/2}}{\varepsilon} \quad (5.52)$$

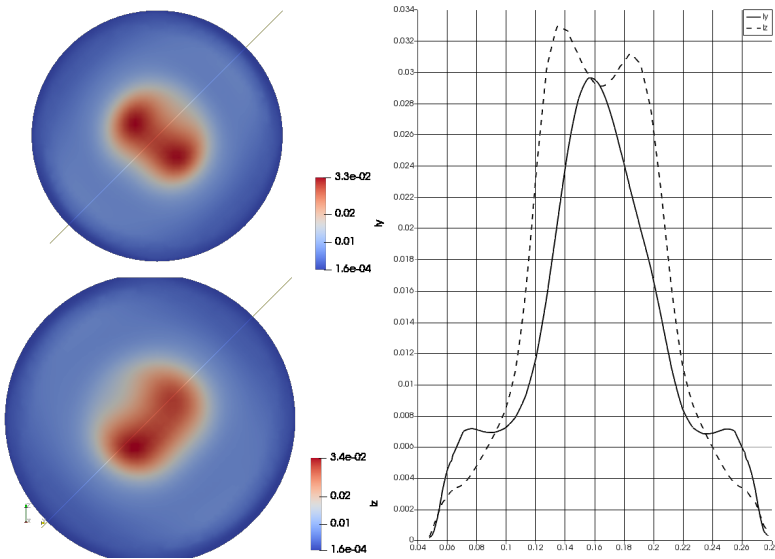
$$\Delta l_z = \frac{\overline{v_{t2}^2}^{3/2}}{\varepsilon} \quad (5.53)$$

Zaś potrzebne wielkości

$$\overline{v_{t1}^2} = -2\nu \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{2}{3}K$$

$$\overline{v_{t2}^2} = -2\nu \frac{\partial v_2}{\partial x_2} + \frac{2}{3}K$$

Wyznaczone wielkości odpowiednich pól przedstawiono na rysunku 5.8. Podział na



Rys. 5.8. Wielkość obszarów o jednorodnych parametrach turbulencji w przekroju poprzecznym kanału wentylatora

podobszary został przeprowadzony w biegunowym układzie odniesienia.

W następnym kroku przeprowadzono syntezę pól prędkości dla $N = 100$ modów w przedziale liczb falowych od 0 do 21000. Na tej podstawie wyznaczono wartości warunku brzegowego dla obszaru w którym propaguje się fala akustyczna.

5.10. Modelowanie promieniowania kanału wentylatora

W wentylatorach promieniowych połączenie obudowy i wirnika odpowiada za wiele zjawisk towarzyszących pracy wentylatorów. Na przykład wirnik bez obudowy generuje jedynie aerodynamiczny hałas szerokopasmowy, bez składowych tonalnych. Ewentualne składowe tonalne mogą pochodzić od niewyważenia, łożysk lub silnika. Natomiast wirnik w obudowie generuje bardzo silne składowe tonalne związane z częstotliwością łopatkową, wynikające z istnienia języka.

W analizowanym wentylatorze osiowym bez kierownic nie ma silnych składowych tonalnych, ale jest bardzo istotny hałas szerokopasmowy.

Propagację hałasu wentylatora modelowano za pomocą równania Helmholtza.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0$$

Równanie opisujące rozkład pola akustycznego w stanie ustalonym rozwiązano metodą elementów skończonych. Przyjęto model osiowosymetryczny, oś kanału pokrywa się z osią pionową układu współrzędnych, wylot kanału skierowany ku górze. Na brzegu stanowiącym promień kanału wentylatora przyjęto źródło. Rozkład prędkości i ciśnień akustycznych przyjęto na podstawie wcześniej wyznaczonych składników źródłowych, na podstawie syntetycznych pól prędkości chwilowych.

Na rysunkach 5.9 oraz 5.10 przedstawiono rozkłady amplitud ciśnień akustycznych wokół kanału wentylatora.



Rys. 5.9. Rozkład amplitud ciśnienia akustycznego wokół wylotu kanału wentylatora dla częstotliwości $f = 474,4$ Hz



Rys. 5.10. Rozkład amplitud ciśnienia akustycznego wokół wylotu kanału wentylatora dla częstotliwości $f = 949,4$ Hz

5.11. Podsumowanie

W niniejszym rozdziale przedstawiono metodę modelowania hałasu wentylatora promieniowego. Metoda może być stosowana do prawie wszystkich maszyn przepływowych. Bardzo ważnym ograniczeniem jest konieczność występowania stosunkowo niewielkich prędkości przepływu.

Analogie aeroakustyczne pozwalają wyznaczyć ciśnienia akustyczne w polu dalekim, ale nie uwzględniają obecności powierzchni odbijających. Zasadniczą zaletą tej metody w porównaniu do analogii aeroakustycznych jest to, że można uwzględnić odbicia fali od przeszkód.

Ze względu na to, że dla wielu akustyków modelowanie przepływów jest dziedziną słabo znaną, dosyć szczegółowo opisano zagadnienia z tym związane. Nie można jednak potraktować tej pozycji jak podręcznika, ponieważ zagadnienie nie zostało wyczerpane.

Opisana metodyka pozwala na prowadzenie prac mających na celu ograniczenie zanieczyszczenia środowiska hałasem pochodzącym od wentylatorów. Dzięki temu dźwięk będzie mniej szkodliwy.

Rozdział 6

Klimat akustyczny górnych przejść dla zwierząt

6.1. Wstęp

Hałas szkodzi nie tylko ludziom, zwierzęta także są narażone na jego szkodliwy wpływ dlatego konieczne należy dbać o to by ingerencja w środowisko nie doprowadzała do nieodwracalnych zniszczeń.

Rozbudowa sieci drogowej i kolejowej zazwyczaj wiąże się z ingerencją w obszary zamieszkałe przez ludzi, bądź w tereny przyrodniczo cenne, dlatego też często powoduje powstawanie konfliktów. Realizacje inwestycji często są przesuwane w czasie ze względu na protesty zgłaszane przez mieszkańców, bądź też ekologów. Jednym z czynników powodujących, iż droga jest „niechcianym” sąsiadem jest hałas. Hałasem, według definicji Słownika Języka Polskiego, nazywamy wszelkie niepożądane, nieprzyjemne i dokuczliwe dźwięki. Może być określany za pomocą różnych jednostek, jednak nazywany jest hałasem tylko w przypadku, gdy jego oddziaływanie ma niekorzystny wpływ na organizm człowieka. W zależności od miejsca oddziaływania hałasu na organizm człowieka obowiązują różne metody pomiaru oraz kryteria jego oceny. Przykładowo, w miejscu pracy procedury badawcze kontroli i oceny zagrożeń akustycznych są związane z obowiązującym Rozporządzeniem Ministra Pracy i Polityki Społecznej Dz.U. 2014, poz. 817, w ocenie hałasu środowiskowego korzysta się z Rozporządzenia Ministra Środowiska Dz.U. 2012, poz. 1109, natomiast w przypadku oceny hałasu na jaki jest narażony człowiek przebywający w budynkach obowiązuje Polska Norma PN-87/B-02151/02 [82].

Jednak hałas ma wpływ również na środowisko przyrodnicze. U zwierząt nadmierny hałas może zmieniać ich naturalne cykle żywieniowe, rozrodcze i migracyjne [83]. W przypadku środowiska przyrodniczego rozbudowa infrastruktury komunikacyjnej prowadzi również do trwałego podziału naturalnych obszarów siedliskowych zwierząt tworząc „efekt bariery”, zmniejszający powierzchnię ich bytowania oraz przerywając szlaki migracyjne. Zwierzęta przemieszczają się, przechodząc przez drogę, zarówno w celu dalekich wędrówek (przykładowo dziki migrują nawet do 300 km), jak i w ramach codziennej aktywności, w tym również w celu zdobywania pożywienia. Brak możliwości migracji skutkuje trudnością w znalezieniu partnera do rozrodu, zahamowaniem przepływu genów, co w efekcie prowadzi do degeneracji

populacji zwierząt żyjących na danym obszarze. W związku z tym stosuje się różne metody umożliwiania zwierzynie przechodzenia przez jezdnię bez jednoczesnego narażania ich oraz ludzi, mogących brać udział w zderzeniu ze zwierzęciem, na utratę życia lub zdrowia [84]. Metodami zapobiegania takim wypadkom są: ustawianie znaków drogowych ostrzegających o możliwości kolizji ze zwierzęciem, montowanie gwizdków odstrasżających na zderzakach samochodów czy też grodzenie poboczy. Co prawda ogrodzenie autostrady siatką zmniejsza śmiertelność zwierząt na drogach, ale jednocześnie powoduje jeszcze silniejszą fragmentację siedlisk [85, 86]. Są również gatunki zwierząt, które z czasem radzą sobie z ogrodzeniem uszkadzając je, bądź podkopując się. Po wejściu zwierzęcia na drogę szybkiego ruchu bardzo często dochodzi do groźnych wypadków, w którym zwierzę nie ma praktycznie żadnych szans na przeżycie. Oczywiście w tego typu wypadkach zdarzają się również ofiary śmiertelne wśród ludzi. Należy zatem pamiętać o konieczności pozostawiania „furtok” umożliwiających bezpieczne przejście na drugą stronę. Takie miejsca nazywane są przejściami dla zwierząt i można je podzielić w następujący sposób:

- przejścia po powierzchni drogi,
- przejścia górne,
- przejścia dolne,
- przejścia o funkcjach zespolonych.

Obiekty takie powinny być lokalizowane w odpowiednich miejscach, muszą posiadać właściwe parametry techniczne, zagospodarowanie i stanowić harmonijną całość z otoczeniem, aby możliwie najlepiej zapewniać ciągłość krajobrazu. Zagadnienia te były już wielokrotnie poruszane zarówno w polskiej, jak i obcojęzycznej literaturze [87, 88]. Niewiele miejsca jest natomiast poświęcone problemom hałasu na tego typu obiektach. Kurek [88, 89] wspomina jedynie, iż mało skuteczne ekranowanie emisji hałasu i światła przez zbyt krótkie ekrany przeciwolśnieniowe oraz nieszczelne i nietrwałe konstrukcje ekranów może utrudniać akceptację takich przejść przez bardziej płochliwe gatunki, w [90] opisuje efekt bariery psychofizycznej polegającej na płoszeniu zwierząt oraz unikaniu przebywania osobników w sąsiedztwie dróg w wyniku obecności oddziaływań związanych z ruchem pojazdów (emisje hałasu, emisje świetlne, emisje chemiczne). W publikacjach [91, 92] autorzy wspominają, iż na zielonych mostach powinny być zainstalowane ekrany o wysokości od 1,5 m do 2,5 m, izolujące od hałasu i światła na drodze. Z kolei Sołowczuk i inni [93–95] opisują jaki jest wpływ zagospodarowania terenu na rozkład poziomy hałasu drogowego na powierzchni górnych przejść. Zwracają oni szczególną uwagę na istotność stosowania wałów ziemnych wzdłuż autostrady na dojeściach do przejścia górnego oraz projektowania niwelety autostrady w niewielkim wykopie. Iglesias i inni [96] przeprowadzili badania na 19 dolnych przejściach dla zwierząt, znajdujących się na 14,5 km odcinku autostrady A-52 w Hiszpanii, mające na celu ustalenie wpływu hałasu na chęć korzy-

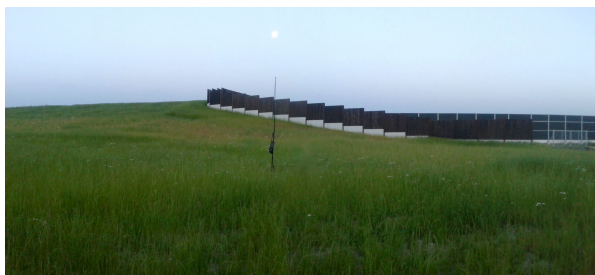
stania z przejść przez kręgowce. Wyniki badań wykazały, iż w przypadku niektórych gatunków (zajęczaki, lisy) częstotliwość wykorzystywania przejść nie była skorelowana z żadnym ze wskaźników hałasu. Jednakże stwierdzili istotny wpływ hałasu na częstotliwość wykorzystywania przejść przez małe ssaki i jaszczurki.

6.2. Obiekty badań

W niniejszym rozdziale poddano analizie siedem górnych przejść dla zwierząt, zarówno mostów krajobrazowych, jak i przejść zespolonych, zbudowanych nad autostradą A4 na odcinku Kraków – Tarnów. Autostrada A4 na odcinku Kraków – Tarnów przebiega obok Puszczy Niepołomickiej, przecina kompleks Lasów Radłowskich oraz Doliny rzek Raby i Dunajca, które wchodzi w skład tzw. południowego korytarza migracyjnego (KPd). Z tego też powodu zbudowano tam aż siedem górnych przejść dla zwierząt, z czego cztery to mosty krajobrazowe. Korzysta z nich wiele gatunków zwierząt, w tym sarny, dziki, lisy, łosie, jelenie oraz drobne ssaki. W dalszych akapitach przedstawiono charakterystykę badanych obiektów.

6.2.1. Most krajobrazowy w Damienicach

Przejście to znajduje się na 452 km autostrady A4, na odcinku Kraków – Szarów, w sąsiedztwie Puszczy Niepołomickiej, posiada 110 m szerokości, 190 m długości, wyjścia realizowane są przez łagodnie pochylone skarpy (15%) rozchylające się w kształt leja o kącie rozwarcia 120° . Autostrada A4 w okolicy przejścia poprowadzona została na niskim nasypie (ok. 2 m powyżej terenu istniejącego) i wyposażona została w ekrany akustyczne (typu zielona ściana) o wysokości 6 m. Przejście wyposażone jest z obydwu stron w drewniane ekrany przeciwoślńieniowe złożone z drewnianych listew, pomiędzy którymi znajduje się warstwa wełny mineralnej. Ekrany te mają wysokość 3 m [97, 98].



Rys. 6.1. Most krajobrazowy w Damienicach koło Puszczy Niepołomickiej – widok na przejście



Rys. 6.2. Most krajobrazowy w Damienicach koło Puszczy Niepołomickiej – widok ogólny

6.2.2. Most krajobrazowy w Jasieniu koło Brzeska

Przejście to znajduje się na 477 km autostrady A4, na odcinku Szarów – Brzesko, w sąsiedztwie Lasów Jodłowskich, nieopodal Lasów Bratucickich. Most ma 40 m szerokości i 200 m długości. Droga przebiega tutaj po istniejącym, płaskim terenie, a przejście wznosi się ponad nią. Z tego też powodu wyjścia realizowane są przez łagodnie nachylone skarpy rozchylające się w kształt leja naprowadzając w ten sposób zwierzęta na przejście. W okolicy przejścia brak jest ekranów akustycznych, natomiast samo przejście zostało wyposażone w ekran akustyczny o wysokości 3 m. Na przejściu brak jest zabezpieczeń przed nieuprawnionym przejazdem pojazdów.



Rys. 6.3. Most krajobrazowy w Jasieniu koło Brzeska – widok na przejście



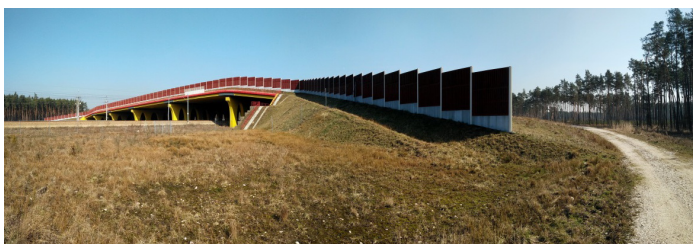
Rys. 6.4. Most krajobrazowy w Jasieniu koło Brzeska – widok ogólny

6.2.3. Mosty krajobrazowe w Łętowicach koło Wierzchosławic

Są to dwa, znajdujące się w odległości 2 km od siebie, przejścia – na 482 i 484 km autostrady A4, na odcinku Brzesko – Wierzchosławice. Autostrada w tym miejscu przecina Lasy Radłowskie. Obydwa mosty są identyczne, posiadają 80 m szerokości i 280 m długości. Droga przebiega tutaj po istniejącym, płaskim terenie, a przejścia wznoszą się ponad nią. Z tego też powodu wyjścia realizowane są przez łagodnie nachylone skarpy rozchylające się w kształt leja, naprowadzając w ten sposób zwierzęta na przejście. W okolicy przejścia brak jest ekranów akustycznych przy autostradzie. Przejścia wyposażone zostały w ekrany akustyczne o wysokości 3 m.



Rys. 6.5. Most krajobrazowy w Łętowicach koło Wierzchosławic – widok na przejście



Rys. 6.6. Most krajobrazowy w Łętowicach koło Wierzchosławic – widok ogólny

6.2.4. Przejścia zespolone w Jodłówce koło Brzeska

Są to dwa, znajdujące się w odległości około jednego kilometra od siebie, przejścia na 464 i 465 km autostrady A4, na odcinku Szarów – Brzesko w pobliżu Lasów Jodłowskich. Pierwsze z przejść (464 km) wznosi się nad drogą, a wyjścia realizowane są poprzez wznoszącą się drogę z dosyć ostrymi skarpami bocznymi. Natomiast przejście na 465 km znajduje się nad drogą poprowadzoną w wykopie. Obydwa przejścia mają szerokość 16 m, z czego 6 m przeznaczony jest na asfaltową jezdnię. Autostrada w okolicy obydwu przejść nie jest ekranowana. Przejścia wyposażone są w ekrany przeciwoślńieniowe o wysokości 3 m.



Rys. 6.7. Przejście zespolone w Jodłówce koło Brzeska (464 km) – widok ogólny



Rys. 6.8. Przejście zespolone w Jodłówce koło Brzeska (464 km) – widok ogólny



Rys. 6.9. Przejście zespolone w Jodłówce koło Brzeska (465 km) – widok na przejście



Rys. 6.10. Przejście zespolone w Jodłówce koło Brzeska (465 km) – widok ogólny

6.2.5. Przejście zespolone w Sterkowcu koło Brzeska

Przejście znajduje się na 474 km autostrady A4, na odcinku Brzesko – Wierchosławice. Z północnej strony wejście na most realizowane jest poprzez łagodnie opadającą skarpe, natomiast z południowej wejście jest z poziomu istniejącego terenu. Autostrada, w okolicy przejścia, poprowadzona w wykopie i jest ekranowana jedynie od strony północnej (od przejścia w stronę Brzeska). Przejścia wyposażone są w ekrany akustyczne o wysokości 3 m.



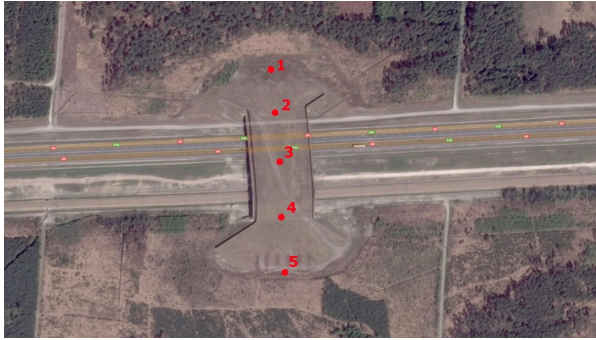
Rys. 6.11. Przejście zespolone w Sterkowcu koło Brzeska – widok na przejście. Z lewej strony widoczny fragment autostrady A4.



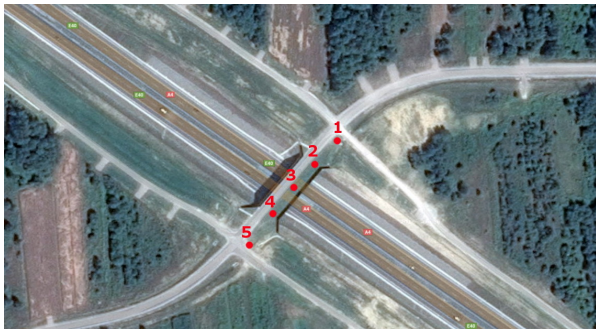
Rys. 6.12. Przejście zespolone w Sterkowcu koło Brzeska – widok ogólny

6.3. Analiza klimatu akustycznego badanych przejść dla zwierząt

Na wyżej wymienionych przejściach prowadzone były pomiary hałasu, generowanego przez ruch drogowy, mające na celu ocenę klimatu akustycznego na przejściach oraz w najbliższej okolicy. Na wszystkich obiektach zastosowano podobny układ punktów pomiarowych – na przyczółkach, w miejscu załamania się ekranu akustycznego czy przeciwolśnieniowego oraz na środku mostu. Na rysunkach 6.13 oraz 6.14 przedstawione zostały rzuty przejścia wraz z rozmieszczeniem punktów pomiarowych.



Rys. 6.13. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na moście krajobrazowym w Łętowicach (482 km) źródło: www.maps.google.pl



Rys. 6.14. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na przejściu zespolonym w Jodłowce (465 km) źródło: www.maps.google.pl

We wszystkich punktach pomiarowych wykonywano pomiary równoważnego poziomu dźwięku (L_{LINeq} – nieskorygowany oraz L_{Aeq} – z zastosowaniem korekcji częstotliwościowej krzywą korekcyjną A). Pomiary wykonywano na wysokości 1,5 m nad poziomem terenu, gdyż odpowiada ona w przybliżeniu wysokości, na której znajdują się receptory słuchowe takich zwierząt jak sarny, jelenie itp. W każdym punkcie czas pomiaru wynosił około 10 – 15 min. Sygnał akustyczny rejestrowano w godzinach 11 – 17. Wyrażone w decybelach wyniki pomiarów przedstawiono w tabelach 6.1 oraz 6.2.

Jednocześnie z sygnałem akustycznym monitorowano natężenie ruchu samochodowego. Wartości natężenia ruchu również przedstawiono w tabelach 6.1 oraz 6.2. Warunki meteorologiczne w czasie wykonywania pomiarów zawiera tabela 6.3.

Analizując powyższe wyniki można zauważyć, że hałas jest zdecydowanie mniejszy, jeśli przejście jest wykonane zgodnie z zaleceniami [93–95], czyli niweleta drogi jest poprowadzona w wykopie, a przejście jest na tym samym poziomie, co pozostała

Tabela 6.1Wyniki pomiarów poziomu dźwięku L_{LINeq} i L_{Aeq} na mostach krajobrazowych

Nr punktu pomiarowego	Damienice		Jasień		Łętowice I (482 km A4)		Łętowice II (484 km A4)	
	L_{LINeq}	L_{Aeq}	L_{LINeq}	L_{Aeq}	L_{LINeq}	L_{Aeq}	L_{LINeq}	L_{Aeq}
1	64,4	55,8	66,9	54,8	66,7	55,6	67,3	56,8
2	64,8	59,3	67,3	58,3	72,5	57,2	69,1	56,6
3	65,3	58,2	75,3	56,7	69,4	56,2	74,4	58,5
4	61,8	54,5	67,9	56,0	72,4	57,4	72,0	55,1
5	59,7	54,3	66,7	56,8	73,6	55,8	73,7	53,8
Natężenie ruchu	osob.	cięż.	osob.	cięż.	osob.	cięż.	osob.	cięż.
	1128	327	1344	456	1276	365	1248	384

Tabela 6.2Wyniki pomiarów poziomu dźwięku L_{LINeq} i L_{Aeq} na przejściach zespolonych

Nr punktu pomiarowego	Jodłówka I (464 km A4)		Jodłówka II (465 km A4)		Sterkowiec	
	L_{LINeq}	L_{Aeq}	L_{LINeq}	L_{Aeq}	L_{LINeq}	L_{Aeq}
1	70,4	64,8	71,1	59,4	63,6	49,2
2	66,9	60,0	69,2	60,9	66,3	53,9
3	68,2	61,4	69,1	61,2	66,8	54,9
4	67,7	60,1	69,7	62,2	67,3	55,4
5	71,8	69,4	72,0	62,0	69,2	61,6
Natężenie ruchu	osobowe	ciężarowe	osobowe	ciężarowe	osobowe	ciężarowe
	2028	302	1985	326	1175	328

Tabela 6.3

Warunki meteorologiczne podczas wykonywania pomiarów

Parametr	Wartość średnia
Ciśnienie [hPa]	1023
Temperatura [°C]	7 – 10
Wilgotność [%]	40 – 50
Prędkość wiatru [m/s]	0 – 4

część terenu. Obydwa przejścia w Jodłówce wyposażone zostały w takie same ekrany przeciwołnieniowe a pomiary wykonywane były w podobnym czasie. Przejście pierwsze wznosi się ponad drogą, podczas gdy drugie jest na powierzchni otaczającego terenu, a droga poprowadzona została w wykopie. Wyniki pomiarów poziomu dźwięku skorygowanego krzywą A w środkowej części obiektu są oczywiście zbliżone, ale już na przyczółkach różnice wynoszą od 5 do 7 dB. Podobne rozwiązanie zastosowano w Sterkowcu (droga w wykopie), jednak na tym przejściu zastosowano ekrany akustyczne, których skuteczność jest wyraźnie widoczna w wynikach pomiarowych (oczywiście po wcześniejszym uwzględnieniu różnicy w natężeniu ruchu pojazdów podczas wykonywanych pomiarów). Niestety wszystkie wyżej opisane obiekty (w Jasieniu i Sterkowcu) są przejściami zespolonymi i nie zostały objęte monitoringiem wizyjnym, który mógłby pozwolić, wraz z monitoringiem hałasu, na próbę znalezienia korelacji poziomu hałasu ze stopniem wykorzystywania obiektów przez zwierzęta.

Mosty krajobrazowe ze względu na znaczną szerokość posiadają zdecydowanie niższe poziomy hałasu w środkowej części w stosunku do przejść zespolonych. Należy jednak zwrócić uwagę, iż wszystkie opisane przejścia wznoszą się ponad powierzchnię drogi, która najczęściej poprowadzona jest na niewielkim nasypie. Okazuje się, że o ile same przejścia wyposażone zostały w ekrany akustyczne, to już dojścia do nich w większości przypadków (Jasień i Łętowice) nie są w żaden sposób zabezpieczone od hałasu docierającego z autostrady. W takich wypadkach zalecane jest stosowanie wałów ziemnych w celu zmniejszenia efektu bariery psychofizycznej spowodowanej nadmiernym hałasem oraz światłami w porze nocnej, a tym samym zwiększenia atrakcyjności całego obiektu. Jedynie w Damienicach autostrada w okolicy przejścia posiada ekrany akustyczne o wysokości 6 m, które mogą stanowić pod tym względem ochronę.

6.4. Podsumowanie

Na podstawie wyników pomiarowych można stwierdzić, iż hałas na badanych przejściach jest znaczny, ale z punktu widzenia dopuszczalnych wartości hałasu w środowisku w odniesieniu do człowieka. Należy jednak pamiętać o tym, że zwierzęta słyszą w inny sposób, niż ludzie [97]. Jednakże brak szczegółowych regulacji prawnych w tym zakresie powoduje, że niejednokrotnie stosowane są kryteria oceny jak dla innych źródeł hałasu (czyli hałasu przemysłowego), budzące sporo kontrowersji. W tym zakresie można się spotkać z podejściem stawiającym wrażliwość świata zwierzęcego na hałas na równi z ludzkim, można się jednak spotkać także z opiniami o większej wrażliwości świata zwierzęcego na hałas. Ani jedno, ani tym bardziej drugie podejście nie powinno być akceptowane, choćby z tego względu, że zwierzę-

ta mają zupełnie inne „charakterystyki” słyszenia, nie do końca zresztą rozpoznane. Poza tym hałas to nie tylko „obiektywnie” zmierzona wartość poziomu dźwięku A, ale to także czynnik subiektywny, ujmujący m.in. porę dnia i miejsce przebywania narażonego osobnika [83, 99]. Dlatego też opisywanie hałasu w takich miejscach, jak przejścia dla zwierząt i ich okolice, przy pomocy poziomu dźwięku A nie wydaje się być dobrym rozwiązaniem, a taka praktyka jest bardzo często spotykana w różnych publikacjach. Niestety, przy obecnym stanie wiedzy, nie da się jednoznacznie określić jak hałas o takim poziomie wpływa na zwierzęta, a przede wszystkim czy nie odstrasza lub zniechęca zwierząt chcących migrować tą drogą. Należy również mieć na uwadze fakt, iż wszystkie przejścia brane pod uwagę w tym artykule powstały w ciągu ostatnich kilku lat. Dlatego też badania należałoby powtórzyć za kilka lat, kiedy to urosną posadzone niedawno drzewa i krzewy.

Poprawne projektowanie przejść dla zwierząt z punktu widzenia hałasu stanowi duży problem, gdyż nie zostały określone dopuszczalne poziomy na tego typu obiektach. Istnieją co prawda dopuszczane wartości poziomu hałasu w środowisku, ale określone w odniesieniu do człowieka, a należy pamiętać o tym, że zwierzęta słyszą w inny sposób. Dlatego tak trudne jest wyznaczenie odpowiednich wartości dopuszczanych, które z kolei są niezbędne do prawidłowego zaprojektowania zabezpieczeń akustycznych na przejściach i w ich okolicy takich jak ekrany akustyczne, czy też nasypy ziemne. Budowa przejścia dla zwierząt jest inwestycją pochłaniającą olbrzymie nakłady finansowe, dlatego też należy dołożyć wszelkich starań, aby była wykonana w prawidłowy sposób, by jej wykorzystanie było zgodne z przeznaczeniem.

W 2016 r. na analizowanych w tym artykule mostach krajobrazowych zainstalowany został monitoring mający na celu określenie ilości i zachowania zwierząt wykorzystujących przejścia, a w efekcie zbadanie skuteczności ich funkcjonowania. Natomiast dodatkowy monitoring hałasu umożliwiłby próbę określenia zależności poziomu hałasu od stopnia wykorzystywania przejść przez zwierzęta oraz określenia ich zachowania na przejściu, np. reakcji na hałas przejeżdżających pod obiektami samochodów i pociągów. Tylko dane uzyskane z długoletnich obserwacji pozwoliłyby na pogłębienie obecnego stanu wiedzy w danym temacie, co umożliwiłoby próbę określenia dopuszczalnych poziomów hałasu na tego typu obiektach oraz ustalenie wytycznych do projektowania kolejnych inwestycji.

Bibliografia

- [1] Yaguo Lei, Jing Lin, Ming J. Zuo, Zhengjia He: *Condition monitoring and fault diagnosis of planetary gearboxes: A review*, Measurement 48 (2014) 292–305
- [2] Braun S., Seth B.B.: *Journal of Sound and Vibration* 65, 37–50. On the extraction and filtering of signals acquired from rotating machines, 1979
- [3] Randall R.B.: *Frequency Analysis*, 49–77, 219–226. Bruel & Kjaer, Denmark, 1987
- [4] Cioch W., Knapik O., Leśkow J.: *Finding a frequency signature for a cyclostationary signal with applications to wheel bearing diagnostics*, Mechanical Systems and Signal Processing, ISSN 0888-3270. – 2013 vol. 38 nr 1 spec. iss.: Condition monitoring of machines in non-stationary operations, s. 55–64
- [5] Lenart L., Leśkow J., Synowiecki R.: *Subsampling in estimation of autocovariance for PC time series*, J. Time Series Anal. 29 (6) (2008) 995–1018
- [6] Ottewill J.R., Orkisz M.: *Condition monitoring of gearboxes using synchronously averaged electric motor signals*. Mechanical Systems and Signal Processing 2013; 38(2):482–498.
- [7] Shao H., Jin W., Qian S.: *Order tracking by discrete Gabor expansion*, IEEE Trans. Instrum. Meas. 52 (3) (2003) 754–761.
- [8] Pan M.C., Chiu C.C.: *Investigation on improved Gabor order tracking technique and its applications*, Journal of Sound and Vibration, 295 (2006) 810–826
- [9] Pawlik P., Lepiarczyk D., Dudek R., Ottewill J.R., Rzeszuciński P., Wójcik M., Tkaczyk A.: *Vibroacoustic study of powertrains operated in changing conditions by means of order tracking analysis*, Eksploatacja i Niezawodność, Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne, ISSN 1507-2711. — 2016 vol. 18 no. 4, s. 606–612
- [10] Popiołek K., Pawlik P.: *Diagnosing the Technical Condition of Planetary Gearboxes Using an Artificial Neural Network Based on Analysis of Non-Stationary Signals*, Diagnostyka, Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, ISSN 1641-6414. — 2016 vol. 17 no. 2, s. 57–64
- [11] Dąbrowski D.: *Condition monitoring of planetary gearbox by hardware implementation of artificial neural networks*, Measurement 91 (2016), ss. 295–308
- [12] Víctor H. Jaramillo, James R. Ottewill, Dudek R., Lepiarczyk D., Pawlik P.: *Condition monitoring of distributed systems using two-stage Bayesian inference data fusion*, Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 87, pt. A, s. 91–110
- [13] National Instrument, *LabVIEW Order Analysis Toolkit User Manual*, 2005
- [14] Cempel C.: *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1982

- [15] Chardon G., Kreuzer W., Noisternig M.: *Design of Spatial Microphone Arrays for Sound Field Interpolation*, Selected Topics in Signal Processing, IEEE Journal of , Vol. 9 , Issue 5, p. 780 – 790, 2015
- [16] Velasco J., Taghizadeh M.J., Asaei A., Boulard H., Martin-Arguedas C.J., Macias-Guarasa J., Pizarro, D.: *Novel GCC-PHAT model in diffuse sound field for microphone array pairwise distance based calibration*, Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2015 IEEE International Conference on, p. 2669 – 2673, 2015
- [17] Scharrer R., Vorlander, M.: *Sound Field Classification in Small Microphone Arrays Using Spatial Coherences*, Audio, Speech, and Language Processing, IEEE Transactions on, Vol. 21, Issue 9, p. 1891 – 1899, 2013
- [18] Dobrucki A.: *Podstawy akustyki*, Politechnika Wrocławska, Wrocław, 1992.
- [19] Batko W., Korbil T. Pawlik P.: *Analiza eksperymentalna przydatności trajektorii fazowych do diagnostyki maszyn wirujących*, Problemy Eksploatacji no 1, 2012
- [20] Malecki I.: *Teoria fal i układów akustycznych*, PWN, Warszawa 1964
- [21] Pawlik P., Lepiarczyk D., Dudek R., Ottewill J.R., Rzeszuciński P., Wójcik M., Tkaczyk A.: *Vibroacoustic study of powertrains operated in changing conditions by means of order tracking analysis*, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 18 (2016) 606–612. doi:10.17531/ein.2016.4.16
- [22] Piechowicz J.: *Wybrane metody analizy właściwości akustycznych pomieszczeń przemysłowych*, Wyd. AGH, Kraków, 2012
- [23] Piechowicz J., Czajka I.: *Estimation of acoustic impedance for surfaces delimiting the volume of an enclosed space*, Archives of Acoustics; 37, 1, 97–102, 2012
- [24] Piechowicz J.: *Estimating surface acoustic impedance with the inverse method*, International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 17, 3, 271–276, 2011
- [25] Piechowicz J.: *An application of the inverse method in the vibroacoustic analysis of industrial rooms*, Acta Physica Polonica A, 121, 1-A: Acoustic and biomedical engineering A-183–A-187, 2012
- [26] Makarewicz R.: *Wstęp do akustyki teoretycznej*, Wydawnictwo UAM, Poznań, 2005
- [27] Malczyk G., Wszółek W.: *Akustyczne metody wykrywania wybranych typów jąkania*: Postępy akustyki 2015
- [28] Pawłowski Z.: *Foniatryczna diagnostyka wykonawstwa emisji głosu śpiewaczego i mówionego*, Oficyna Wyd. „Impuls”, Kraków, 2005.
- [29] Reroń E., Tadeusiewicz R., Modrzejewski M., Wszółek W.: *Application of Neural Networks and Pattern Recognition Methods to the Evaluation of Speech Deformation Degree for Patients Surgically Treated for Larynx Cancer*, Neuroendocrinology Letters, vol.19, No. 4, pp.147-157, 1998, Mattes-Heidelberg-Germany
- [30] Tadeusiewicz R.: *Sygnal mowy*. WKiŁ, Warszawa, 1988
- [31] Tadeusiewicz R., Modrzejewski M., Wszółek W.: *Una Aplicación de Redes Neuronales y Métodos de Reconocimiento de Imágenes en la Evaluación del Grado de Deformación de la Voz en los Enfermos de Cáncer de Laringe Sometidos a Tratamientos Quirúrgicos*, Simulación, Boletín de Investigación Instituto McLeod de Ciencias de Simulación, Universidad Panamericana, Vol. 4, No. 4, 1998, pp. 4 – 14
- [32] Tarkowski Z.: *Psychosomatyka jąkania*, Wydawnictwo fundacji „Orator”, Lublin 2007
- [33] Titze I.R.: *Principles of Voice Production*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1994.

- [34] Wszolek W., Wszolek T.: *Automatic Understanding of Speech Signal*, Chapter in book: Kłopotek A., Wierzchoń S., Trojanowski K. (eds.): *Intelligent Information Processing and Web Mining*, Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg – New York, 2004, pp. 609-620
- [35] Wszolek W.: *Selected methods of pathological speech signal analysis*, Archives of Acoustics, 2006, vol. 41, issue 4, pp. 414–440.
- [36] Wszolek W., Kłaczyński M.: *Acoustics methods of voice estimation after surgical treatment of the vocal tract*, Archives of Acoustics, 2005 vol.40, no 4 suppl., 194-197, 2005.
- [37] Wszolek W.: *Metody kognitywnej kategoryzacji w zastosowaniu do analizy i klasyfikacji wybranych przypadków mowy patologicznej*, Monografie, Wydawnictwa AGH
- [38] Książkiewicz–Jóźwiak B., Wszolek W.: *Widmowa ocena stopnia deformacji sygnału mowy u pacjentów leczonych protezami całkowitymi*. Prot. Stom. XXXVII, 2, 1987
- [39] Demenko G.: *Analiza cech suprasegmentalnych języka polskiego na potrzeby technologii mowy*, UAM, Poznań, 2000.
- [40] <http://www.easyvoice.pl>
- [41] Grocholewski S.: *Statystyczne podstawy systemu ARM dla języka polskiego*, WPP, Poznań 2001
- [42] Ozimek E.: *Dźwięk i jego percepcja. Aspekty fizyczne i psychoakustyczne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa – Poznań 2002.
- [43] Snow A.: *Mechanical Vibration*, 1912
- [44] Piecha M., Król P., Kubacki J., Polak A., Stanula A., Najder M., Chmielewska D.: *Fizjoterapia polska*, **3(4)**, 6, 2006
- [45] Runge M., Rehfeld G., Resnicek E.: *J Musculoskeletal Interact*, **1**, 2000
- [46] Rittweger J., Seller G., Felsenberg D.: *Clinical physiology*, **20(2)**, 2000, DOI:10.1046/j.1365-2281.2000.00238.x
- [47] Rittweger J., Schiessl H., Felsenberg D.: *European journal of applied physiology*, **86**, 2001. DOI:10.1007/s00421-009-1303-3
- [48] Żychowska M., Gawinek M.: *Journal of Human Kinetics*, **8**, 2002.
- [49] Damijan Z., Uhryński A.: *Acta Physica Polonica A*, **123**, **6**, 2013. DOI:10.12693/APhysPolA.123.497
- [50] Bogaerts A., Delecluse C., Claessens A.L., Boonen S., Verschueren S.M., *Gait & Posture*, **26**, **2**, 2007. DOI:10.1016/j.gaitpost.2006.09.078
- [51] Damijan Z., Uhryński A.: *Acta Physica Polonica A*, **121**, **1-A**, 2012
- [52] Kerschman-Schindl K., Grampp S., Henk C., Resch H., Preisinger E., Fialka-Moser V., Imhof H.: *Clinical physiology*, **21(3)**, 2001. DOI:10.1046/j.1365-2281.2001.00335.x
- [53] Madhavan G., Stewart J.M., McLeod K.J.: *Biomedical instrumentation & technology*, **40(1)**, 2006. DOI: 10.2345/0899-8205(2006)40[78:CSRBPS]2.0.CO;2
- [54] Naito E., Kinomura S., Geyer S., Kawashima R., Roland P.E., Zilles K.: *The Journal of Neurophysiology*, **83**, **3**, 2000.
- [55] Błaszczuk J. (red.), *Biomechanika kliniczna*, 2006.
- [56] Pruszczyk P., Hryniewiecki T., Drożdż J. (red.): *Kardiologia, część I*, 2009
- [57] Opolski G., Filipiak G., Poloński J. (red.): *Ostre zespoły wieńcowe*, 2004
- [58] Hettinger T., Muller E.A.: *Seasonal course of trainability of musculature*, *Int Z Angew Physiol*, **16**, 1956

- [59] Traczyk W.Z.: *Fizjologia człowieka w zarysie*. Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 1989
- [60] Fortuna S.: *Wentylatory. Podstawy teoretyczne, zagadnienia konstrukcyjno-eksploatacyjne i zastosowanie*, TECHWENT, Kraków, 1999
- [61] Fortuna S., Czajka I.: *Eksperymentalna weryfikacja wybranych zależności opisujących moc akustyczną wentylatorów*, Ciepłne Maszyny Przepływowe, Seria: Turbomachiny, Zeszyty Naukowe – Politechnika Łódzka, Łódź 2010
- [62] Engel Z.: *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*, PWN, Warszawa, 1993.
- [63] Romik D., Czajka I., Gołaś A.: *Badania numeryczne wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych na hałas aerodynamiczny wentylatora promieniowego*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Tom 18, nr 2, Kraków, 2016
- [64] Horvat I., Kameier F.: *Aeroakustische Optimierung von Radialventilatoren in Spiralgehäusen*, DAGA, 2010, Tagungsband
- [65] Bechara W., Bailly Ch., Lafon P., Candel S.M.: *Stochastic approach to noise modeling for free turbulent flows*, 1994, American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, vol 32, Issue 3, s. 455 – 463
- [66] Béchara W., Lafon P., Bailly C., Candel S.M.: *Application of a κ - ϵ turbulence model to the prediction of noise for simple and coaxial free jets*, 1995, The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 97, Issue 6, s. 3518–3531
- [67] Bommers L., Fricke J., Klaes K.: *Ventilatoren*, Vulkan Verlag, Essen, 1994.
- [68] Engel Z., Piechowicz J., Stryczniewicz L.: *Podstawy wibroakustyki przemysłowej*, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Mechaniki i Wibroakustyki, Kraków, 2003
- [69] Jarosz K., Czajka I., Gołaś A.: *Implementation of Ffowcs Williams and Hawkins aeroacoustic analogy in OpenFOAM*, W: Vibrations in physical systems, XXVII symposium : Bedlewo, May 9–13 2016, ed. Cempel Cz., Dobry M.W., Stręk T., Poznań University of Technology, Mechanical Engineering and Management Faculty. Institute of Applied Mechanics, Polish Society of Theoretical and Applied Mechanics — Poznań 2016
- [70] Czajka I., Gołaś A.: *Inżynierskie metody analizy numerycznej i planowanie eksperymentu*, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydawnictwa AGH, 2017
- [71] Czajka I., Jarosz K.: *The use of aeroacoustic analogies in radial fan noise modelling*, Archives of Acoustics, 2016 vol. 41 no. 3, s. 616. — LXIII Open Seminar on Acoustics OSA 2016, Warszawa–Białowieża, 13th–16th September 2016.
- [72] Suder-Dębska K., Czajka I.: *The use of Amiet's theory to estimation of an aerodynamic noise of fans*. W: Ochrona i inżynieria środowiska: zrównoważony rozwój, IX konferencja, Kraków–Kocierz, 7–8 września 2017 r. Szkoła Ochrony i Inżynierii Środowiska im. W. Goetla. Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica, Kraków 2017
- [73] Czajka I.: *O wykorzystaniu płaskich modeli wentylatorów promieniowych do projektowania i optymalizacji*. W: Zagadnienia budowy i eksploatacji wentylatorów, red. t. Banaś M., Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH, 2016
- [74] Lighthill M.J.: *On sound generated aerodynamically I. General theory*, Proceedings

- of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1952, vol. 211, s. 564–587.
- [75] Farassat F.: *Linear acoustic formulas for calculation of rotating blade noise*, 1981, AIAA Journal, vol. 19, Issue 9, s. 1122–1130
- [76] Gołaś A., Ciesielka W., Czajka I., Czechowski M., Filipek R., Suder–Dębska K., Szopa K., Śliwiński M., Wołoszyn J., Żywiec W.: *Mechanical engineering in Smart Grid technology*, AGH, Kraków, 2015.
- [77] Heckl M., Muller H.A.: *Taschenbuch der Technischen Akustik*, Springer Verlag, Berlin–Heidelberg–New York, 1975.
- [78] Romik D., Czajka I., Gołaś A.: *Badania numeryczne wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych na hałas aerodynamiczny wentylatora promieniowego*, Transactions of the Strata Mechanics Research Institute, 18, 2, 43–52, 2016.
- [79] Schlender F., Klingenberg G.: *Ventilatoren im Einsatz*, VDI Verlag, Dusseldorf, 1996.
- [80] Otte J.: *Badania wysoko sprawnych wentylatorów promieniowych*, Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012
- [81] Brentner K.S., Farassat F.: *Analytical Comparison of the Acoustic Analogy and Kirchhoff Formulation for Moving Surfaces*, AIAA Journal, Vol. 36, No. 8 (1998), pp. 1379–1386.
- [82] Korbiel T., Stępień B., Batko W., Barański R., Mleczo D., Pawlik P., Blaut J., *Recognition of the 24-hour noise exposure of a human*, Archives of Acoustics ; ISSN 0137-5075, vol. 42 no. 4, s. 601–607, 2017
- [83] Wszolek T., Kłaczyński M., Mleczo D., Ozga A., *On Certain Problems Concerning Environmental Impact Assessment of Wind Turbines in Scope of Acoustic Effects*, Acta Physica Polonica. A vol. 125 no. 4-A, s. A-38–A-44, 2014
- [84] Piechowicz J., Ozga A., Mleczo D., Kasprzak C., Stryczniewicz L., *Ekologia akustyczna na obszarach leśnych*, Monografie Katedry Mechaniki i Wibroakustyki, Kraków 2015
- [85] Jaeger J.A.G., Fahring L., Effects of road fencing on population persistence, *Conservation Biology* 18, s. 1651 – 1657, 2004
- [86] Okarma H., *Wilk*, Biblioteka Przyrodniczo – łowiecka, Tom 2, Wydawnictwo H2O, 2015. ISBN: 978-83-927737-8-8
- [87] Jędrzejewski W. i in., *Zwierzęta a drogi. Metody ograniczania negatywnego wpływu dróg na populacje dzikich zwierząt*. ZBS PAN, Białowieża: 1 – 95, 2006
- [88] Kurek R. T. *Poradnik projektowania przejść dla zwierząt i działań ograniczających śmiertelność fauny przy drogach*. Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska, Warszawa 2010
- [89] Kurek R. T., Ślusarczyk R., *Górne przejścia dla zwierząt w Polsce – wspólny sukces drogowców i przyrodników*, *Budownictwo i Architektura* 13(1), s. 167 – 180, 2014
- [90] *Ochrona dziko żyjących zwierząt przy inwestycjach drogowych w Polsce / red. Rafał T. Kurek*. - Bystra : Stowarzyszenie Pracownia na rzecz Wszystkich Istot, 2007. ISBN 83-919879-7-3
- [91] Burdzik R., Wojtas K., *Drogi i migracje zwierząt – strefy kolizyjne*, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, Seria: Transport z. 71, Nr kol. 1836, s. 19 – 26. 2011
- [92] Wysokowski A., Staszczuk A., Bosak W., *Przejścia dla zwierząt w budownictwie komunikacyjnym. Propozycja zaleceń normalizujących zagadnienie*, (w) *Ochrona dziko*

- żyjących zwierząt przy inwestycjach drogowych w Polsce. Stowarzyszenie Pracownia na rzecz Wszystkich Istot, s.32 – 41, Bystra 2007
- [93] Sołowczuk A., *Wpływ zagospodarowania terenu na rozkład poziomy hałasu drogowego na powierzchni górnych przejść habitatowych*, Inżynieria i Budownictwo 2015 nr 5, s. 234-237
- [94] Sołowczuk A., *Niemieckie doświadczenia w ochronie środowiska i budowie przejść dla zwierząt na przykładzie niemieckiej autostrady A20*, praca zbiorowa "Ochrona Środowiska i Estetyka a Rozwój Infrastruktury Drogowej", Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna KILiW PAN oraz GDDKiA, s. 390 – 401, Kazimierz Dolny 2009
- [95] Sołowczuk A., Czarnecki J.: *Ocena poziomu hałasu na górnych przejściach dla zwierząt przy różnym zagospodarowaniu przejścia i otoczenia*, Drogi Lądowe - Powietrzne - Wodne 2010 nr 12, s. 46 – 55
- [96] Iglesias C., Mata C., Malo J.E., *The Influence of Traffic Noise on Vertebrate Road Crossing Through Underpasses*, „Ambio”. 41 (2), s. 193–201, 2012. DOI: 10.1007/s13280-011-0145-5
- [97] Mleczek D., Ozga A., Kłaczyński M., Piechowicz J., Kasprzak C., *Acoustic climate of the wildlife crossing over the A4 expressway*, 7th forum acusticum 2014, Kraków, 7–12.09.2014 : book of abstracts and programme
- [98] Kasprzak C., Ozga A., Mleczek D., Piechowicz J., *Badania pilotażowe klimatu infradźwiękowego w Puszczy Niepołomickiej*, Postępy akustyki 2015, s. 87 – 98
- [99] Wiciak J., Mleczek D., Ozga A., Wszolek G., Wierzbicki J., Piechowicz J., Małecki P., *Quietness in the soundscape of the Białowieża National Park*, Acta Physica Polonica. A vol. 128 no. 1-A, s. A-79–A-84, 2015

Skorowidz

A

analiza

- rzędów, 11
- sygnałów, 11

analogia

- aeroakustyczna, 62
- Ffowcsa-Williamsa i Hawkingsa, 69
- Lighthilla, 68

C

całka Kirchhoffa, 70

chirurgia szczękowo-twarzowa, 38

częstotliwość

- formantowa, 42
- podstawowa, 34

D

DES, 71

diagnostyka

- maszyn, 9
- medyczna, 27, 35
- wibroakustyczna, 9

dipol, 60

DNS, 62, 66

drżania ogólne, 7

E

EGG, 45

EKG, 50

eksperyment diagnostyczny, 10

elektroglottografia, 45

F

fałdy

- głosowe, 32
- przedsionkowe, 32

filtr

kaskadowo-grzebieniowy, 11

przestrzenny, 71

funkcja Heaviside'a, 69

H

hałas

aerodynamiczny, 58

komunikacyjny, 81

szerokopasmowy, 60, 61

tonalny, 60

wentylatorów, 58

wentylatorów – czynniki, 59

I

intubacja, 40

K

kwadrupeł, 62

L

LabVIEW, 26

LES, 71

luźna łąpa, 10

M

metoda

elementów skończonych, 79

objętości skończonych, 68

moc akustyczna, 61

model

$k-\varepsilon$, 67

$k-\omega$ SST, 66

turbulencji, 66

moment widmowy, 42

monopole, 60

MRF, 74

multispectrum, 42

O

obliczeniowa dynamika płynów, 65

P

parametry

częstotliwościowe sygnału, 42

fizjologiczne, 50

parametryzacja sygnału, 41

posturografia, 50

potencjał akustyczny, 15

poziom

aktywacji, 50

istotności, 7

ufności, 38

przedział ufności, 38

R

RANS, 66

rezonator

nasady, 33

piersiowy, 33

rozpoznawanie mowy, 28

równanie

ciągłości, 66

Eulera, 62

Eulera zlinearyzowane, 62

falowe, 16

Helmholtza, 79

Naviera–Stokesa, 66

Naviera–Stokesa uśrednione, 66

S

SNGR, 71

społeczeństwo informacyjne, 27

straty wolumetryczne, 59

syntezowanie pola prędkości, 71

szczelina przywlotowa, 59

T

terapia, 35

termografia, 50

test

Kołmogorowa–Smirnowa, 7

Thayera, 50

T-Studenta, 7

ton podstawowy, 34

transformacja

Gabora, 9

transmitancja widmowa, 17

trening wibracyjny, 47

W

WBV, 56

wibracja całego ciała, 7, 56

widmo

amplitudowo-częstotliwościowe, 19

amplitudowo-fazowe, 19

fonemu, 37, 39

mowy poprawnej, 40

mowy zdeformowanej, 41

rzędów, 11

turbulencji, 73

von Karmana, 73

wpływ obciążenia, 13

współczynnik

cepstralny, 28

mel-cepstralny, 43

mocy względnej, 43

predykcji liniowej, 28

wzór

Bommesa, 64

Engela, 62

Klingenberga, 62

Schlendera, 62

Ź

źródła

akustyczne, 78

hałasu wentylatorów, 58

zmienności głosu, 36

ISBN: 978-83-61402-38-1